

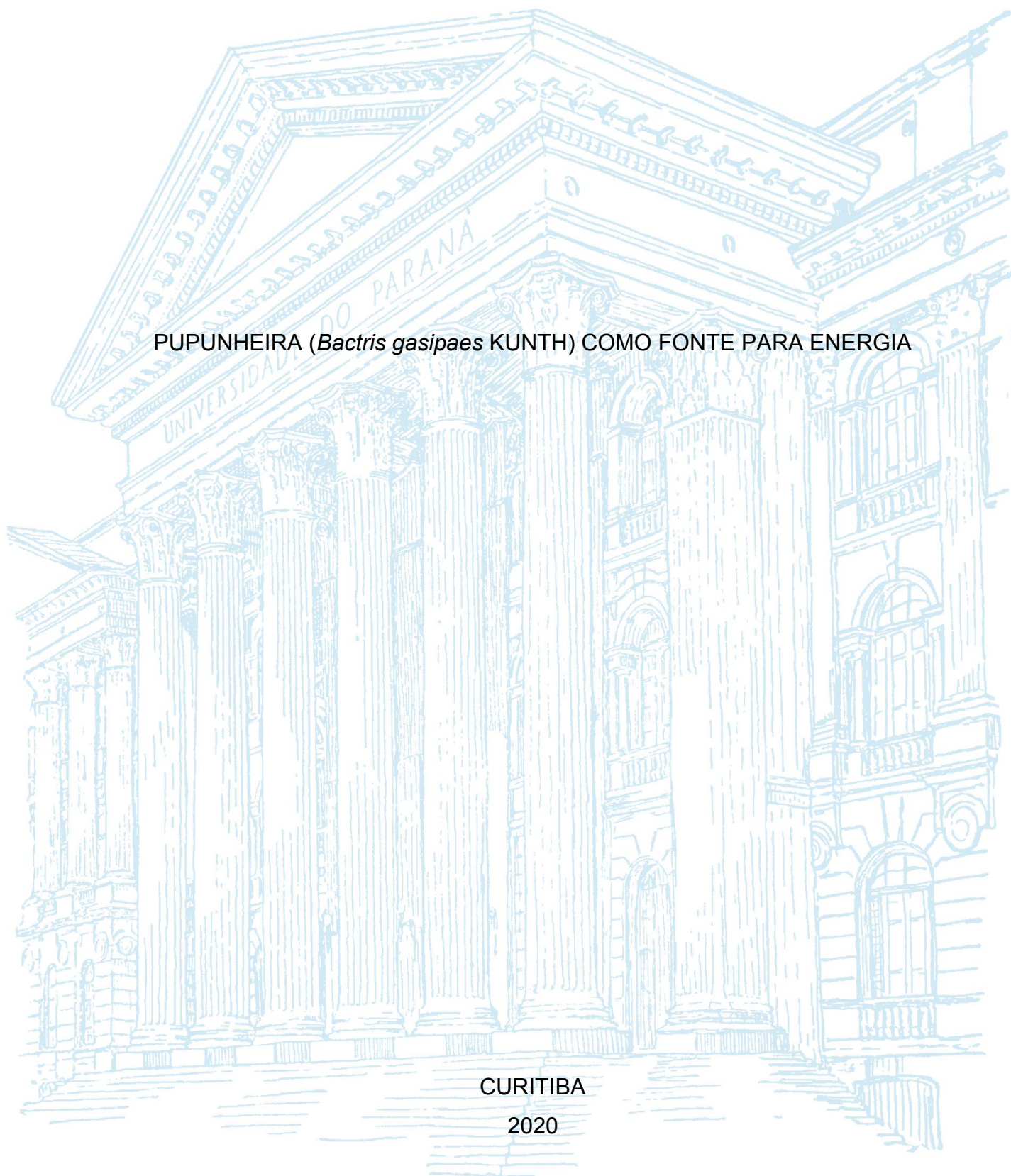
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SANDRA LUCIA SOARES MAYER

PUPUNHEIRA (*Bactris gasipaes* KUNTH) COMO FONTE PARA ENERGIA

CURITIBA

2020



SANDRA LUCIA SOARES MAYER

PUPUNHEIRA (*Bactris gasipaes* KUNTH) COMO FONTE PARA ENERGIA

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Coorientadores: Dr. Fernando Augusto Ferraz
Prof. Dr. Ivan Crespo Silva

CURITIBA

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Mayer, Sandra Lucia Soares

Pupunheira (*Bactris gasipaes* KUNTH) como fonte para energia /
Sandra Lucia Soares Mayer. – Curitiba, 2020.
123 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Coorientadores: Dr. Fernando Augusto Ferraz

Prof. Dr. Ivan Crespo Silva

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Defesa: Curitiba, 12/11/2020.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Palmito – Cultivo. 2. Pupunheira. 3. Biomassa. 4. Resíduos
vegetais. 5. Teses. I. Silva, Dimas Agostinho da. II. Ferraz, Fernando
Augusto. III. Silva, Ivan Crespo. IV. Universidade Federal do Paraná,
Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.22

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160

TERMO DE APROVAÇÃO



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **SANDRA LUCIA SOARES MAYER** intitulada: **PUPUNHEIRA (*Bactris gasipaes* KUNTH) COMO FONTE PARA ENERGIA**, sob orientação do Prof. Dr. DIMAS AGOSTINHO DA SILVA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 12 de Novembro de 2020.

Assinatura Eletrônica
15/11/2020 11:13:23.0
DIMAS AGOSTINHO DA SILVA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
16/11/2020 09:07:01.0
THIAGO CAMPOS MONTEIRO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
19/11/2020 14:46:38.0
MARTHA ANDREIA BRAND
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica
16/11/2020 08:45:49.0
ELDER ELOY
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN)

Assinatura Eletrônica
17/11/2020 09:41:12.0
FABIANE SALLES FERRO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE)

Assinatura Eletrônica
15/11/2020 15:48:01.0
RAQUEL MARCHESAN
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE TOCANTINS)

Dedico este trabalho à minha mãe Zilda Soares Mayer (*in memoriam*) pelo amor incondicional, por todo esforço e dedicação.

Ao meu amor Thiago Pereira Natal pelo companheirismo, apoio e incentivo.

Ao meu filho Bryan que deu um sentido especial à minha existência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por minha vida, por minha fé, por me manter no caminho certo, por não me fazer desistir, principalmente nos momentos difíceis durante a realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR), por me proporcionar tantos momentos de aprendizagem, alegrias e felicidades e pelos amigos que fiz ao longo desta trajetória.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido, que viabilizou a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela infraestrutura e formação técnico científica.

Ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR – EMATER (IDR – Paraná) pela estrutura e viabilidade do desenvolvimento deste trabalho na unidade de pesquisa de Morretes – UNI - MR, ao sr. Marcos Treitny e ao sr. Erilson Teodoro pelo apoio no decorrer do trabalho, aos demais funcionários da unidade de pesquisa que colaboraram com o trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva pela oportunidade e pela confiança depositada para realização deste trabalho, pela parceria e pela amizade nestes anos de convivência.

Ao meu coorientador Dr. Fernando Augusto Ferraz por toda ajuda no trabalho de campo e laboratório que foi fundamental no desenvolvimento do trabalho, pelo apoio e incentivo nos momentos difíceis e pela amizade desenvolvida nestes anos

Ao meu coorientador Dr. Ivan Crespo Silva por todo conhecimento repassado, pelo apoio e pela amizade.

A minha querida amiga Clarice de Andrade por toda ajuda, pelo apoio, pelo incentivo e principalmente pelo bom humor durante a realização deste trabalho, e pela amizade ao longo destes anos de convivência.

Ao meu amigo Rudson Silva Oliveira por toda ajuda no trabalho de campo e laboratório, pelo incentivo e apoio nos momentos mais difíceis, por estar sempre disposto a ajudar, pelos momentos de diversão e pela amizade desenvolvida.

As minhas amigas Vivian Takahashi e Eloisa Camilo Mossato, por toda ajuda no desenvolvimento do trabalho, pelos momentos alegres e felizes, pelo apoio e pela amizade.

À Vitória Roberta Ferreira pelo apoio, incentivo e pelas risadas.

À Bruna Carvalho dos Santos pela ajuda nas etapas de preparação e análises realizadas, estando sempre à disposição.

Ao meu pai José Norberto Mayer pelo esforço em assegurar condições para realização dos meus estudos.

À minha mãe Zilda Soares Mayer (*in memoriam*) pelo amor incondicional, pela compreensão das minhas escolhas e dos momentos em que me ausentei, pelas palavras de conforto e incentivo, e pelo último abraço que me motivou a continuar esta jornada.

Aos meus sogros José Renato e Valentina pelo apoio e ajuda principalmente nos momentos críticos.

Ao Thiago pelo amor, pelo companheirismo, pela paciência e pelo apoio durante a realização deste trabalho, por estar comigo em todos os momentos e fazer com que eu não desistisse, pelas inúmeras vezes que enxergou o melhor em mim.

Ao meu filho Bryan por me mostrar que sou mais forte do que pensava, que sou mais dedicada do que imaginava, e mais feliz do que jamais sonhei em ser.

Meus agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

“Se quiser ir rápido, vá sozinho. Se
quiser ir longe, vá acompanhado.”

(Provérbio africano)

RESUMO

A espécie *Bactris gasipaes* Kunth (pupunheira) foi introduzida no estado do Paraná na década de 1980 com objetivo experimental. Na década de 1990, iniciou-se o cultivo da *B. gasipaes* para produção comercial de palmito, com a aceitação do produto no mercado o cultivo da espécie na região cresceu substancialmente. Na colheita do palmito é gerada grande quantidade de biomassa não aproveitável ficando sem uso e destinação comercial. Portanto, o objetivo deste trabalho foi analisar o potencial energético da biomassa residual da espécie *B. gasipaes* resultante do corte do palmito no litoral do estado do Paraná (PR). O trabalho foi efetuado na estação experimental do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná - IAPAR – EMATER (IDR – Paraná), onde foram selecionadas três (3) locais com cultivo de *B. gasipaes* para produção de palmito. A biomassa das pupunheiras foi dividida em estipe, bainha e folha, as quais foram pesadas em campo e retiradas amostras para realização do estudo. O material coletado foi transportado ao Laboratório de Energia de Biomassa na Universidade Federal do Paraná (UFPR), onde foi preparado e separado para realização das análises físicas, químicas e energéticas. Modelos matemáticos foram ajustados para estimar a produção de biomassa das plantas utilizadas neste estudo. A biomassa do estipe também foi avaliada quanto a influência da degradação natural ao longo do tempo, na sua qualidade energética. A biomassa seca total estimada foi de 31,82; 24,97 e 46,25 ton ha⁻¹ para os locais 1, 2 e 3 respectivamente. Entre os materiais usados no estudo, o estipe é o componente com a maior contribuição no fornecimento de biomassa verde e a folha é o componente com maior contribuição no fornecimento de biomassa seca. A folha apresentou as maiores médias para poder calorífico superior, poder calorífico inferior na umidade recebida, lignina, produtividade energética e menores teores de umidade, sendo o componente mais indicado para obtenção direta de energia, inversamente, o estipe foi o componente menos indicado para esta finalidade. Nas análises de termogravimetria em atmosferas de nitrogênio e ar sintético, a folha apresentou maior estabilidade térmica dos que os demais componentes analisados. O estipe apresentou maior inflamabilidade e combustibilidade e menor estabilidade térmica. A degradação natural do estipe de *B. gasipaes* das plantas analisadas não influenciou nos valores médios para poder calorífico superior, em relação ao material não degradado, não afetando sua qualidade energética. Entretanto a perda de massa ao longo do tempo foi bem acentuada, afetando diretamente a produtividade energética dos estipes, diminuindo a quantidade de energia produzida.

Palavras-chave: Bioenergia. Pupunha. Resíduo. Biomassa.

ABSTRACT

The species *Bactris gasipaes* Kunth (pupunheira) was introduced in the state of Paraná in the 1980s for experimental purposes. In the 1990s, the cultivation of *B. gasipaes* for the commercial production of heart of palm began, with the acceptance of the product on the market, the cultivation of the species in the region grew substantially. In the heart of palm harvest, a large amount of unusable biomass is generated, remaining unused and commercially destined. Therefore, the objective of this work was to analyze the energetic potential of the residual biomass of the species *B. gasipaes* resulting from the cut of the heart of palm on the coast of the state of Paraná (PR). The work was carried out at the experimental station of the Institute of Rural Development of Paraná - IAPAR - EMATER (IDR - Paraná), where three (3) sites with *B. gasipaes* cultivation for palm heart production were selected. The biomass of the peach palm trees was divided into stipe, sheath and leaf, which were weighed in the field and samples were taken to carry out the study. The collected material was transported to the Biomass Energy Laboratory at the Federal University of Paraná (UFPR), where it was prepared and separated for physical, chemical and energy analysis. Mathematical models were adjusted to estimate the biomass production of the plants used in this study. Stipe biomass was also assessed for the influence of natural degradation over time, on its energy quality. The estimated total dry biomass was 31.82; 24.97 and 46.25 ton ha⁻¹ for sites 1, 2 and 3 respectively. Among the materials used in the study, stipe is the component with the greatest contribution to the supply of green biomass and the leaf is the component with the greatest contribution to the supply of dry biomass. The leaf presented the highest averages for higher heating value, net calorific value in the received humidity, lignin, energy productivity and lower moisture content, being the component most suitable for obtaining direct energy, conversely, the stipe was the least suitable component for this goal. In the thermogravimetry analyzes in atmospheres of nitrogen and synthetic air, the sheet showed greater thermal stability than the other components analyzed. The stem showed greater flammability and combustibility and less thermal stability. The natural degradation of the *B. gasipaes* stipe of the analyzed plants did not influence the average values for higher heating value, in relation to the non-degraded material, not affecting its energy quality. However, the loss of mass over time was quite accentuated, directly affecting the energy productivity of the stipes, decreasing the amount of energy produced.

Keywords: Bioenergy. peach palm. Residue. Biomass.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - <i>Bactris gasipaes</i> KUNTH EM MORRETES, NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ.....	25
FIGURA 2 - PARTE CENTRAL DO ESTIPE DE <i>Bactris gasipaes</i> KUNTH DELIMITADA PELO CÓRTEX	26
FIGURA 3 - RESÍDUOS DA COLHEITA E DO DESCASCAMENTO DO PALMITO DE <i>Bactris gasipaes</i> KUNTH NO ESTADO DO PARANÁ – ESTIPE (A), FOLHA (B) E BAINHA (C)	29
FIGURA 4 - ÁREA DE ESTUDO	45
FIGURA 5 - PARCELA P1 (A), PARCELA P2 (B) E PARCELA P3 (C).....	46
FIGURA 6 - IDENTIFICAÇÃO DAS PLANTAS (A) E INSERÇÃO DA FOLHA FLECHA (B)	47
FIGURA 7 - TOCO APÓS ABATE (A), ESTIPE CORTADA (B), FOLHAS (C) E PALMITO (D)	48
FIGURA 8 - ESQUEMA PARA CUBAGEM POR HOHENADL	49
FIGURA 9 - PESAGEM DOS COMPONENTES DA <i>Bactris gasipaes</i> (A) E AMOSTRAS PARA ANÁLISE EM LABORATÓRIO (B)	50
FIGURA 10 – SEÇÃO DO ESTIPE (A) E DISCOS (B) DE <i>Bactris gasipaes</i>	50
FIGURA 11 – SEPARAÇÃO DO PALMITO DAS BAINHAS: PALMITO COM BAINHA (A), BAINHA (B) E PALMITO (C)	51
FIGURA 12 - BAINHA DA FOLHA (A), PECÍOLO (B), RÁQUIS (C) E PINAS (D)	51
FIGURA 13 - COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA DE FOLHA: BAINHA (A), PECÍOLO (B), RÁQUIS (C) E PINAS (D).....	55
FIGURA 14 - DISCOS DE <i>Bactris gasipaes</i> SELECIONADOS PARA OBSERVAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DA BIOMASSA AO LONGO DO TEMPO	60
FIGURA 15 - ÁREAS DE PREDOMINÂNCIA DOS ÓXIDOS DO TIPO S, TIPO C, TIPO CK E TIPO K.....	64
FIGURA 16 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DE BIOMASSA SECA TOTAL EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA TOTAL DE PLANTAS DE <i>Bactris gasipaes</i>	73

FIGURA 17 - DEGRADAÇÃO DE DISCOS DE <i>Bactris gasipaes</i> DOS LOCAIS 1 (A), 2 (B) E 3 (C).....	104
---	-----

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - ÁREA CULTIVADA COM PALMITO NO BRASIL E NAS REGIÕES NORTE, NORDESTE, SUDESTE, SUL E CENTRO-OESTE	30
GRÁFICO 2 - PRODUÇÃO DE PALMITO NO BRASIL E NAS REGIÕES NORTE, NORDESTE, SUDESTE, SUL E CENTRO-OESTE.....	31
GRÁFICO 3 - VALOR DA PRODUÇÃO DE PALMITO NO BRASIL E NAS REGIÕES NORTE, NORDESTE, SUDESTE, SUL E CENTRO-OESTE	32
GRÁFICO 4 - ÁREA COLHIDA DE PALMITO NA REGIÃO SUL DO BRASIL, NO ESTADO DO PARANÁ, NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ E NO MUNICÍPIO DE MORRETES.....	34
GRÁFICO 5 - PRODUÇÃO DE PALMITO NA REGIÃO SUL DO BRASIL, NO ESTADO DO PARANÁ, NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ E NO MUNICÍPIO DE MORRETES (A). VALOR DA PRODUÇÃO DE PALMITO NA REGIÃO SUL DO BRASIL, NO ESTADO DO PARANÁ, NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ E NO MUNICÍPIO DE MORRETES (B)	35
GRÁFICO 6 - RENDIMENTO DA PRODUÇÃO DE PALMITO NA REGIÃO SUL DO BRASIL, NO ESTADO DO PARANÁ, NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ E NO MUNICÍPIO DE MORRETES.....	36
GRÁFICO 7 - PARTICIPAÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO MUNDO (A); FONTES DE BIOCOMBUSTÍVEL QUE PARTICIPAM DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO MUNDO (B).....	38
GRÁFICO 8 - OFERTA INTERNA DE ENERGIA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA, ANO 2019	39
GRÁFICO 9 - PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA VERDE DOS COMPONENTES ESTIPE, BAINHA, FOLHAS E PALMITO EM <i>Bactris gasipaes</i>	66
GRÁFICO 10 - DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA POR CLASSE DE DIÂMETRO PARA AS PLANTAS DE <i>Bactris gasipaes</i>	69
GRÁFICO 11 - COMPORTAMENTO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR MÉDIO DA BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> EM RELAÇÃO AO TEOR DE UMIDADE BASE ÚMIDA	86
GRÁFICO 12 - CURVAS TG E DTG DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO COMPONENTE ESTIPE (A), BAINHA (B) E FOLHA (3) DA	

BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> SOB ATMOSFERA DE NITROGÊNIO NA TAXA DE AQUECIMENTO DE 10 °C min ⁻¹	89
GRÁFICO 13 - CURVAS TG E DTG DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO COMPONENTE ESTIPE (A), BAINHA (B) E FOLHA (C) DA BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> SOB ATMOSFERA DE AR SINTÉTICO NA TAXA DE AQUECIMENTO DE 10 °C min ⁻¹	91
GRÁFICO 14 - CURVAS TG E DTG DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> SOB ATMOSFERA DE AR SINTÉTICO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO DE 5, 10, E 20 °C min ⁻¹	93
GRÁFICO 15 - CURVAS TG E DTG DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> SOB ATMOSFERA DE NITROGÊNIO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO DE 5, 10, E 20 °C min ⁻¹	94
GRÁFICO 16 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i>	102
GRÁFICO 17 - PERDA DE MASSA PERCENTUAL (A); PERDA DE MASSA EM KG (B) AO LONGO DO TEMPO PARA BIOMASSA DEGRADADA DO ESTIPE DE <i>Bactris gasipaes</i>	105
GRÁFICO 18 - TEORES DE MATERIAL VOLÁTIL E CARBONO FIXO DE BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> EM PROCESSO DE DEGRADAÇÃO NATURAL	106
GRÁFICO 19 - SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO 1% E TEOR DE CINZAS DE BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> EM PROCESSO DE DEGRADAÇÃO NATURAL	107
GRÁFICO 20 - PODER CALORÍFICO SUPERIOR E PODER CALORÍFICO INFERIOR NA UMIDADE RECEBIDA DE BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> EM PROCESSO DE DEGRADAÇÃO NATURAL	108
GRÁFICO 21 - PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA DA BIOMASSA DEGRADADA DO ESTIPE DE <i>Bactris gasipaes</i> EM RELAÇÃO À BIOMASSA NÃO DEGRADADA	109

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MODELOS ESTATÍSTICOS TESTADOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA TOTAL	53
TABELA 2 - MÉDIAS, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS MENSURADAS NOS LOCAIS 1, 2 E 3, VOLUME E DENSIDADE BÁSICA	67
TABELA 3 - ANÁLISE DE CORRELAÇÃO (MÉTODO DE PEARSON) DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES COM A VARIÁVEL DEPENDENTE	70
TABELA 4 - COEFICIENTES E ESTATÍSTICA DE PRECISÃO DOS MODELOS TESTADOS E AJUSTADOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA SECA DAS PUPUNHEIRAS NA REGIÃO DE MORRETES – PR	71
TABELA 5 - ESTIMATIVA DE BIOMASSA SECA DE <i>Bactris gasipaes</i> PARA AS PARCELAS 1, 2 E 3 E O TOTAL PARA A ÁREA DE ESTUDO	74
TABELA 6 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA (%)	75
TABELA 7 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL MATERIAL VOLÁTIL	77
TABELA 8 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL CARBONO FIXO	78
TABELA 9 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL CINZA (%)	79
TABELA 10 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL EXTRATIVO TOTAL (%)	80
TABELA 11 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL HOLOCELULOSE (%)	81
TABELA 12 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL LIGNINA TOTAL (%)	82
TABELA 13 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL PODER CALORÍFICO SUPERIOR (%)	83
TABELA 14 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL PODER CALORÍFICO INFERIOR (%)	84

TABELA 15 -	TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL PODER CALORÍFICO INFERIOR NA UMIDADE RECEBIDA (%).....	85
TABELA 16 -	TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DOS FATORES LOCAL E CLASSE DE DIÂMETRO PARA A VARIÁVEL PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA (MJ ha ⁻¹).....	87
TABELA 17 -	TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NO FATOR COMPONENTE PARA A VARIÁVEL PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA (MJ ha ⁻¹).....	87
TABELA 18 -	CARACTERÍSTICAS DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DOS COMPONENTES ESTIPE, BAINHA E FOLHA DE <i>Bactris gasipaes</i> SOB ATMOSFERA DE NITROGÊNIO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO 5, 10 E 20 °C min ⁻¹	95
TABELA 19 -	CARACTERÍSTICAS DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DOS COMPONENTES ESTIPE, BAINHA E FOLHA DE <i>Bactris gasipaes</i> SOB ATMOSFERA DE AR SINTÉTICO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO 5, 10 E 20 °C min ⁻¹	96
TABELA 20 -	TEMPERATURA E TAXA DE PERDA DE MASSA NOS PICOS NA CURVA DTG DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> SOB ATMOSFERA DE NITROGÊNIO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO 5, 10 E 20 °C min ⁻¹	97
TABELA 21 -	TEMPERATURA E TAXA DE PERDA DE MASSA NOS PICOS NA CURVA DTG DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> SOB ATMOSFERA DE AR SINTÉTICO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO 5, 10 E 20 °C min ⁻¹	98
TABELA 22 -	TEMPERATURAS DE IGNIÇÃO E <i>BURNOUT</i> DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO 5, 10 E 20 °C min ⁻¹	99
TABELA 23 -	PRINCIPAIS ÓXIDOS PRESENTES NAS CINZAS DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE <i>Bactris gasipaes</i> DETERMINADOS POR FRX	101

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	- Óxido de Alumínio
ANOVA	- Análise de variância
APG	- <i>Angiosperm Phylogeny Group</i>
ASTM	- <i>American Society For Testing And Materials</i>
B _{sc}	- Biomassa seca do componente
CaO	- Óxido de Cálcio
CF	- Carbono fixo
Cl	- Cloro
C _{LS}	- Concentração de lignina solúvel
CZ	- Cinzas
d ₁₀	- Diâmetro a 10 cm de altura do solo
d ₃₀	- Diâmetro a 30 cm de altura do solo
DBC	- Delineamento em blocos casualizados
DGEOL	- Departamento de geologia
d _m	- Diâmetro médio
DQUI	- Departamento de química
DTG	- Termogravimetria derivada
EXT	- Extrativos
FCM	- Fator de correção de Meyer
Fe ₂ O ₃	- Óxido de Ferro III
FRX	- Fluorescência de Raios X
g _i	- Área transversal
HDPE	- <i>High-density polyethylene</i>
hl	- <i>height leaf</i>
HOLO	- Holocelulose
IBGE	- Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística
IDR	- Instituto de Desenvolvimento Rural
IEA	- <i>International Energy Agency</i>
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
K ₂ O	- Óxido de Potássio
LI	- Lignina insolúvel

LS	- Lignina solúvel
LT	- Lignina total
MgO	- Óxido de Magnésio
MME	- Ministério de Minas e Energia
MnO	- Óxido de Manganês
MV	- Material volátil
Na ₂ O	- Óxido de Sódio
NBR	- Norma Brasileira
NP	- Número de perfílos
P1	- Parcela 1
P2	- Parcela 2
P ₂ O ₅	- Pentóxido de Fósforo
P3	- Parcela 3
PCI	- Poder calorífico inferior
PCI _{UR}	- Poder calorífico inferior na umidade recebida
PCS	- Poder calorífico superior
PE	- Produtividade energética
R ² _{aj}	- Coeficiente de determinação ajustado
Rb ₂ O	- Óxido de Rubídio
SiO ₂	- Dióxido de Silício
SO ₃	- Óxido Sulfúrico
S _{xy} %	- Erro padrão da estimativa
TAPPI	- Technical Association Of The Pulp And Paper Industry
TG	- Termogravimetria
TiO ₂	- Dióxido de Titânio
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
v	- volume
χ^2	- Qui-quadrado
ZnO	- Óxido de Zinco
ZrO ₂	- Dióxido de Zircônio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1 CARACTERÍSTICAS BOTÂNICAS E VARIABILIDADE GENÉTICA	24
2.2 CULTIVO E MANEJO.....	27
2.3 PRODUÇÃO DE PALMITO NO BRASIL	29
2.4 CULTIVO DE PALMITO NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ.....	32
2.5 BIOENERGIA	37
2.6 USOS TECNOLÓGICOS DA BIOMASSA DE PALMEIRAS	40
3 MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1 LOCALIZAÇÃO E ÁREA DE ESTUDO	44
3.2 INVENTÁRIO E COLETA DO MATERIAL.....	46
3.3 PREPARAÇÃO DO MATERIAL E ANÁLISES FÍSICAS	50
3.4 AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS.....	52
3.5 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E ANÁLISES QUÍMICAS E ENERGÉTICAS.....	55
3.5.1 Preparação do material	55
3.5.2 Análise química imediata.....	56
3.5.3 Análise química macromolecular.....	57
3.5.4 Degradação da biomassa do estipe de <i>Bactris gasipaes</i> ao longo do tempo ..	59
3.5.5 Poder calorífico superior e inferior.....	61
3.5.6 Análise termogravimétrica (TG).....	62
3.5.7 Composição e classificação química das cinzas	63
3.6 DELINEAMENTO ESTATÍSTICO.....	64
4 RESULTADO E DISCUSSÕES	66
4.1 AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS E ESTIMATIVA DE BIOMASSA SECA... ..	66
4.2 ANÁLISES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E ENERGÉTICAS.....	74
4.2.1 Teor de umidade da biomassa de <i>Bactris gasipaes</i>	74
4.2.2 Análise imediata e composição estrutural da biomassa de <i>Bactris gasipaes</i> ...	76
4.2.3 Poder calorífico e produtividade energética da biomassa de <i>Bactris gasipaes</i>	83
4.2.4 Análise termogravimétrica (TG) e comportamento térmico da biomassa de <i>Bactris gasipaes</i>	88

4.2.5 Caracterização das cinzas da biomassa de <i>Bactris gasipaes</i> por FRX.....	100
4.3 DEGRADAÇÃO DA BIOMASSA DO ESTIPE DE <i>BACTRIS GASIPAES</i> AO LONGO DO TEMPO	103
5 CONCLUSÃO	111
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS.....	113
APÊNDICE A - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS UMIDADE E PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA	119
APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS MATERIAL VOLÁTIL, CARBONO FIXO, CINZA, PODER CALORÍFICO SUPERIOR, INFERIOR E INFERIOR NA UMIDADE RECEBIDA	120
APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS EXTRATIVO, LIGNINA E HOLOCELULOSE	121
APÊNDICE D – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA ENSAIO DE DEGRADAÇÃO DO ESTIPE DE BACTRIS GASIPAES	122

1 INTRODUÇÃO

A bioenergia, energia proveniente de biomassa, é uma alternativa às fontes de energias convencionais que desperta interesse cada vez maior devido as suas características de obtenção e à ampla disponibilidade de matéria-prima existente e renovável em escala global. Oriunda de fonte renovável, a bioenergia gera poucos poluentes, em comparação com os combustíveis de origem fóssil, não corrobora para a intensificação da emissão dos gases do efeito estufa e das mudanças climáticas, quando queimada corretamente. Apresenta menor risco ambiental (poluição do ar e degradação de ambientes), apresenta baixo custo e alta capacidade de reaproveitamento de resíduos de processos produtivos. Em contrapartida, as biomassas sólidas apresentam menor poder calorífico, em comparação a combustíveis fósseis, maiores dificuldades com transporte e estocagem e grandes variações de umidade e densidade que podem afetar suas características.

Atualmente, a produção de eletricidade e combustíveis de transporte, a partir de biomassa é praticada em vários países. Como exemplo disso, o Brasil destaca-se no cenário mundial por ser o país que mais utiliza combustíveis renováveis (43,5%) em sua matriz energética, sendo 18% a contribuição da biomassa como fonte de energia (BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020).

O Brasil é destaque pela produção agrícola e florestal, e com isso há grande geração de resíduos lignocelulósicos nestes processos produtivos. A valorização energética destes materiais pode ser uma alternativa para a descentralização e consolidação de uma matriz energética nacional limpa e ambientalmente adequada (FARIA *et al*, 2016). O país possui um estoque significativo de energia, considerando a quantidade de biomassa produzida, que poderia ser melhor aproveitada (DIAS *et al*, 2012), porém as propriedades da biomassa residual gerada a partir de culturas agrícolas e florestais nem sempre são conhecidas, sendo essa uma das razões para o seu aproveitamento pouco eficiente. Neste sentido, destaca-se a importância na realização de estudos a respeito do potencial e desempenho energético das biomassas lignocelulósicas produzidas no país, com intuito de otimizar o seu aproveitamento em grande escala e com a máxima eficiência.

A espécie *Bactris gasipaes* Kunth (pupunheira) é cultivada nas Américas Central e do Sul, é originária de regiões tropicais, com clima quente e úmido. No

Estado do Paraná a espécie foi introduzida na década de 1980 na estação experimental do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná - IAPAR – EMATER – (IDR – Paraná) localizada no município de Morretes com finalidade experimental. A espécie se desenvolveu bem na região e posteriormente, na década de 1990, começou a ser cultivada para produção de palmito, que tem potencial para ser colhido de forma sustentável porque, ao contrário das palmeiras solitárias, esta palmeira multiforme não morre após a colheita do palmito.

O cultivo da espécie *B. gasipaes* no litoral do estado do Paraná visava aumentar a produtividade de palmito, pois tem a característica de produzir perfilhos e ciclo de corte mais rápido que o da *Euterpe edulis* Mart. (juçara), a primeira colheita pode ser realizada com 18 a 24 meses pós plantio, e posteriormente a cada 12 meses. Além disso contribuiu para mitigar o processo extrativista da *E. edulis*, que possui restrições legais para sua produção e consumo.

O cultivo de pupunheiras cresceu significativamente nas duas últimas décadas no estado do Paraná, pois muitos produtores que possuíam outras culturas como a banana (*Musa* sp.), mandioca (*Manihot esculenta*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*) como principal fonte de renda, passaram a cultivá-la inicialmente para produzir o palmito como um adicional na renda familiar. Com o aceite do produto no mercado, alguns produtores passaram a ter o palmito pupunha como sua principal fonte de renda.

A pupunheira assim como outras palmeiras, precisa ter o perfilho todo cortado para a retirada do palmito e o percentual da planta aproveitável para este fim é em torno de 3 a 5% da biomassa total, o restante é descartado, permanecendo em campo como resíduo, gerando assim uma grande quantidade de biomassa que atualmente não tem destinação.

A permanência deste material no campo é importante para a reciclagem de nutrientes e a incorporação de matéria orgânica no solo, que são de fundamental importância para o crescimento das plantas. Porém a grande quantidade de biomassa gerada acaba sendo prejudicial ao cultivo, devido a dificuldades de manejo das touceiras e das plantas, no replantio e as colheitas sequenciais. O produtor, além de receita obtida com a venda do palmito produzido, pode aproveitar o resíduo gerado pelo cultivo como matéria-prima na geração de energia limpa, através de uma fonte renovável.

Nesse contexto, e considerando o resíduo de biomassa decorrente do uso da pupunheira para produção de palmito, a seguinte hipótese foi formulada: a biomassa residual após a colheita do palmito de pupunheira pode ser utilizada como fonte de energia. Assim, o objetivo geral do presente trabalho foi analisar o potencial energético da biomassa residual da espécie *B. gasipaes* Kunth, proveniente da colheita do palmito na região do litoral do estado do Paraná. Nesse sentido os seguintes objetivos específicos foram elaborados:

- Estimar a produção de biomassa residual após a colheita do palmito de *B. gasipaes*;
- Avaliar a qualidade energética da biomassa residual de *B. gasipaes*;
- Analisar o comportamento térmico da biomassa residual de *B. gasipaes*;
- Avaliar a influência da degradação natural da biomassa do estipe de *B. gasipaes* na sua qualidade energética;

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CARACTERÍSTICAS BOTÂNICAS E VARIABILIDADE GENÉTICA

As palmeiras são Angiospermas, monocotiledôneas da ordem Arecales pertencentes à família Arecaceae (Palmae) (APG IV, 2016), apresentando desenvolvimento característico. As raízes são do tipo fasciculada, em matas úmidas outras raízes podem aparecer no caule acima do solo, o estipe (caule) possui estrutura diferente das árvores dicotiledôneas sendo que a medula central é esponjosa e cercada por um anel formado por fibras fortes que a protegem. Essas fibras formam feixes verticais de tecido condutor, xilemas e floemas e são destituídos de tecido cambial, não havendo aumento em diâmetro (LORENZI *et al.*, 2004).

As folhas apresentam-se em grande diversidade nas palmeiras, são formadas essencialmente por um eixo no qual são distinguidas três regiões: bainha, pecíolo e lâmina. A bainha é a base inferior que envolve total ou parcialmente o caule, o pecíolo é a continuação da bainha e constitui a parte livre da folha, podendo ser curto ou longo. A lâmina é a parte verde folhosa que pode ser inteira ou variavelmente dividida e seus segmentos podem ser dispostos de forma regular ou irregularmente ao longo da ráquis, parte central mais rígida, e são chamadas de pinadas e os segmentos de pinas (LORENZI *et al.*, 2004).

O gênero *Bactris* possui ao menos 73 espécies (Henderson, 2000) sendo a espécie *Bactris gasipaes* Kunth (FIGURA 1) comumente conhecida como *pejibaye* na Costa Rica, pupunha no Brasil e em outros países pode ser chamada de *chontaduro*, *pibá*, *peach palm* e *pijuayo* (CHACÓN *et al.*, 2016). O uso da pupunheira pela população humana é muito antigo o que a torna a palmeira de grande importância na América desde a era pré-colombiana (MORA-URPÍ; WEBER; CLEMENT, 1997).

FIGURA 1 - *Bactris gasipaes* KUNTH EM MORRETES, NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: A autora (2020).

O estipe da *B. gasipaes* pode ser do tipo multicaule ou solitário, com alturas que variam entre 4 e 18 metros, e diâmetros entre 7 e 20 cm. Os entrenós possuem espinhos rígidos de coloração marrom escuro a preto, algumas variedades possuem mutações que não desenvolvem espinhos (HENDERSON, 2000). Em estipes não maduros a parte central é delimitada do córtex pela transição abrupta de feixes axiais periféricos, os feixes externos possuem fibras de bainha maciça e formam o principal tecido mecânico do caule que aumenta progressivamente com a idade, devido ao espessamento contínuo da parede secundária das fibras vasculares e células intermediárias do parênquima (FIGURA 2) (MAGELLAN; TOMLINSON; HUGGETT, 2015).

FIGURA 2 - PARTE CENTRAL DO ESTIPE DE *Bactris gasipaes* KUNTH DELIMITADA PELO CÓRTEX

FONTE: A autora (2020).

O contraste entre as regiões internas e externas é mais eficiente mecânica e hidraulicamente em estipes maduros, células de sílica estão presentes em associação com feixes de fibras. As fibras são do tipo vascular, largas e longas com a parede tornando-se progressivamente espessada, lamelada e lignificada com amadurecimento prolongado, e não-vascular, curtas e estreitas com rápido amadurecimento (MAGELLAN; TOMLINSON; HUGGETT, 2015).

Os tecidos vasculares não mostram alterações com a idade, a maturação da fibra sempre começa nas bainhas das fibras adjacentes ao floema e progride radialmente para fora em direção a periferia da bainha do feixe. O espessamento da parede é acompanhado por lignificação, de modo que a capacidade mecânica do estipe aumenta progressivamente à medida que as camadas externas da região central se tornam mais rígidas. Esse contraste entre as camadas externas extremamente duras e as regiões centrais macias, embora mecanicamente sejam altamente eficientes, torna essas plantas objetos difíceis para estudo anatômico (MAGELLAN; TOMLINSON; HUGGETT, 2015).

As folhas podem apresentar espinhos espalhados ou pouco agrupados medindo entre 1 e 3 cm, bainha e pecíolo medindo entre 0,70 e 1,30 metros de comprimento e ráquis medindo entre 1,80 a 3,50 metros de comprimento com pinas dispostas em diferentes planos (HENDERSON, 2000). As folhas pinadas possuem

aproximadamente 160 folíolos, são pubescentes em ambas as superfícies (abaxial e adaxial), a cor verde escura predomina na superfície adaxial e o verde claro na superfície abaxial (CHACÓN *et al.*, 2016).

Os folíolos possuem nervuras laterais paralelas e uma nervura central mais proeminente, são anfiestomáticos nas áreas intercostais alternando com grupos de células epidérmicas. Ambas as superfícies apresentam grande quantidade de cera epicuticular (CHACÓN *et al.*, 2016). A presença da epicutícula está relacionada a regulação da transpiração e a perda passiva de água (TAIZ *et al.*, 2017).

A maior diversidade genética da *B. gasipaes* na América do sul está particularmente na Amazônia ocidental, em comparação com América Central. A pupunheira atualmente cultivada na América Latina, provavelmente evoluiu de uma espécie selvagem, a variedade *gasipaes* não existia no último período glacial (GALLUZZI *et al.*, 2015). A domesticação é um processo contínuo e são esperadas mudanças graduais da espécie selvagem para as espécies domesticadas e semi-domesticadas, em populações abundantemente domesticadas almeja-se que essas encontrem-se ao longo de todo o processo (CLEMENT *et al.*, 2017).

A espécie domesticada foi capaz de manter populações em florestas antropizadas, sob condições mais úmidas, uma vez que foi dispersa da região sudoeste para o oeste da Amazônia (CLEMENT *et al.*, 2017). Nestes centros concentraram-se e criaram uma diversidade de culturas, para que através da seleção, cultivo e comércio garantissem a sobrevivência e a subsistência de seus habitantes, que mediados por humanos esses processos manifestaram convergências em diferentes raças (GALLUZZI *et al.*, 2015).

2.2 CULTIVO E MANEJO

A *B. gasipaes* é uma espécie tropical, portanto o clima ideal para seu desenvolvimento é sob uma precipitação média anual acima de 1.600 mm bem distribuídos ao longo do ano e temperatura média anual acima de 22 °C (SILVA, [s.d.]). No litoral do estado do Paraná a precipitação média anual é superior a 2.500 mm distribuídas ao longo do ano, e a temperatura média anual é de cerca de 22 °C, sendo a região ideal para o cultivo da espécie (NEVES *et al.*, 2004).

Solos profundos, bem drenados, de textura areno-argilosa, com topografia plana ou levemente ondulada, pH entre 5,5 e 6 são preferíveis para o cultivo da

pupunheira, embora se adapte em solos ácidos essa faixa de pH otimiza a eficiência da absorção de nutrientes. Solos mal drenados, compactados e muito arenosos devem ser evitados, pois a espécie não tolera solos encharcados, e a compactação prejudica o desenvolvimento dos perfilhos (rebrotas) (SILVA, [s.d.]).

Regiões com características edafoclimáticas mais propícias ao cultivo da pupunheira são aqueles que apresentam certas similitudes com o padrão de umidade amazônica, como é o caso de regiões presentes nos estados do Paraná, Santa Catarina, São Paulo e Bahia. Com isso a implantação da pupunheira para produção de palmito, nestas regiões, é uma ótima opção do ponto de vista ambiental e econômico, trazendo melhorias na qualidade de vida dos produtores (PENTEADO JUNIOR; SANTOS; NEVES, 2014).

O plantio deve ser realizado em áreas abertas com incidência de luz, as covas podem ter dimensões de 40 x 40 x 40 cm. O espaçamento deve ser escolhido de acordo com o tipo de mercado a ser atendido, a fertilidade natural do solo, e principalmente o programa de fertilização, se houver. No litoral do Paraná, o espaçamento usualmente utilizado é o 2,0 x 1,0 m (5.000 plantas por hectare). Nas primeiras semanas é primordial que se façam vistorias de campo, para quantificar o número de mudas para o replantio e para verificar e controlar possíveis ataques de pragas e doenças (NEVES *et al.*, 2004).

O manejo de perfilhos, principalmente em plantios com densidade acima de 5.000 plantas ha⁻¹, é de fundamental importância para evitar competição por luz, água e nutrientes. Ao longo do tempo a produção pode ser prejudicada caso o manejo de perfilhos não seja feito de forma adequada, devido existir uma relação direta com as variáveis: intensidade de corte, densidade de plantio, longevidade da planta e produção de palmito (NEVES *et al.*, 2004). A produção em povoamentos com densidade de 5.000 plantas ha⁻¹ é em média de 2.500 hastes de palmito ha⁻¹ no segundo ano, a produção é estabilizada entre 3.500 e 4.500 hastes ha⁻¹ a partir do terceiro ano (PENTEADO JUNIOR; SANTOS; NEVES, 2010).

O cultivo da pupunheira é de rápido crescimento e pode ser manejado de forma escalonada, onde o plantio é realizado na primavera (novembro até a primeira quinzena de dezembro). O primeiro corte é realizado no verão do ano subsequente ao plantio, os segundo e terceiro cortes são realizados com intervalos de três meses a partir do primeiro. O total de plantas colhidas nos primeiros 18 meses pode atingir cerca de 50% das plantas cultivadas inicialmente, reduzindo a idade de corte e

proporcionando abertura do dossel, o que permite entrada de luz que favorece o crescimento dos perfilhos (SILVA, [s.d.]).

O corte pode ser realizado em plantas com alturas a partir de 1,65 m, medidas do solo até a inserção da folha flecha, ou com diâmetros de aproximadamente 12 cm, medidos ao nível do solo (NEVES *et al.*, 2007).

O palmito é retirado do topo do estipe da palmeira, após seu corte as folhas, bainhas e partes do estipe são descartados como resíduo de lavoura (FIGURA 3) ou parcialmente aproveitados na alimentação animal (MORAES, 2011). O beneficiamento do palmito na indústria gera considerável quantidade de resíduos vegetais, os quais são depositados em locais inadequados e quando não aproveitados se tornam um problema ambiental. Sendo sua destinação final, locais próximos ao processamento do palmito, o que causa a ocupação de áreas que poderiam ser utilizadas pela própria indústria, para atividades agrícolas ou para fins de preservação do meio ambiente (GARCIA *et al.*, 2011).

FIGURA 3 - RESÍDUOS DA COLHEITA E DO DESCASCAMENTO DO PALMITO DE *Bactris gasipaes* KUNTH NO ESTADO DO PARANÁ – ESTIPE (A), FOLHA (B) E BAINHA (C)



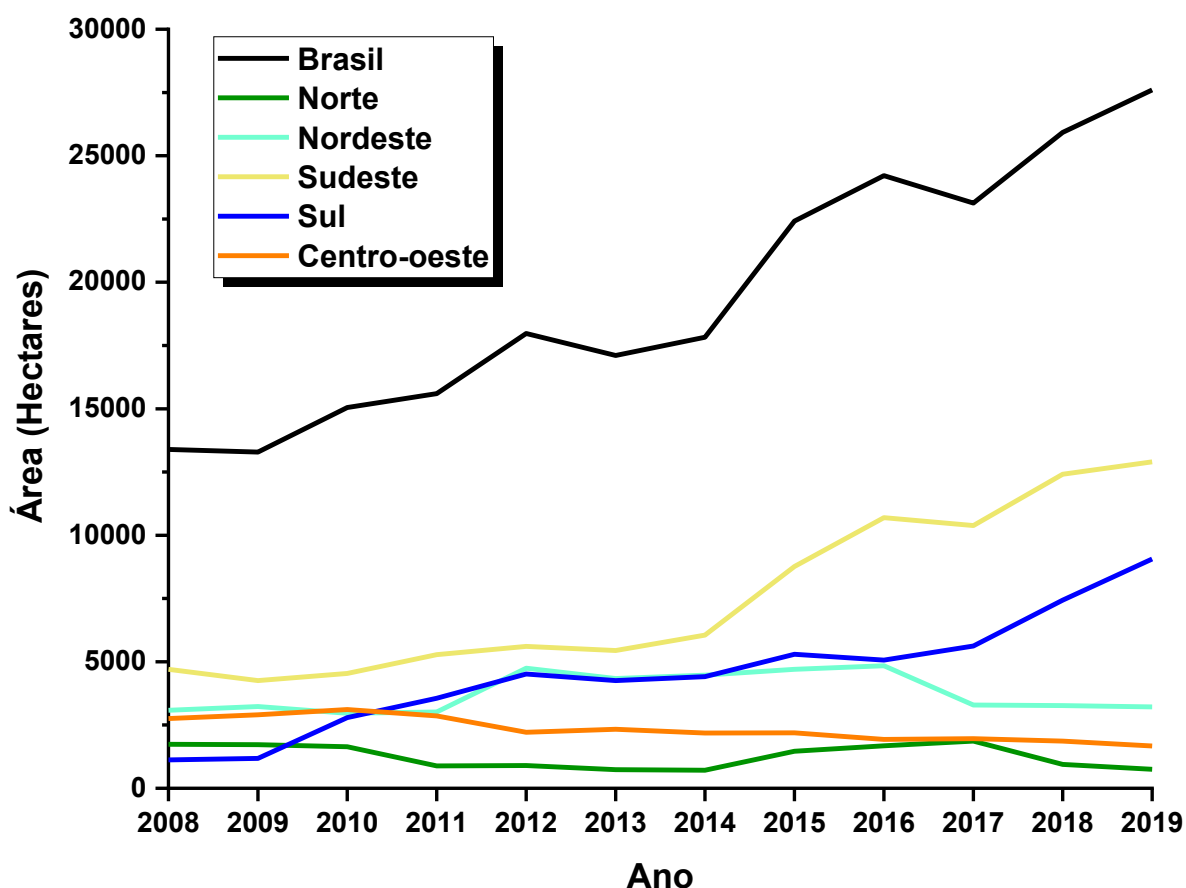
FONTE: A autora (2020).

2.3 PRODUÇÃO DE PALMITO NO BRASIL

A área cultivada com palmito no Brasil teve um crescimento substancial, em 2008 a área era de 17.006 hectares em 2019 de 27.603 hectares um aumento de 39,4%. As regiões Sul e Sudeste são as maiores responsáveis por esse crescimento,

possuindo respectivamente 9.060 e 12.903 hectares, totalizando 21.963 hectares da área de cultivo que corresponde a 79,6% da área total (GRÁFICO 1) (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2020).

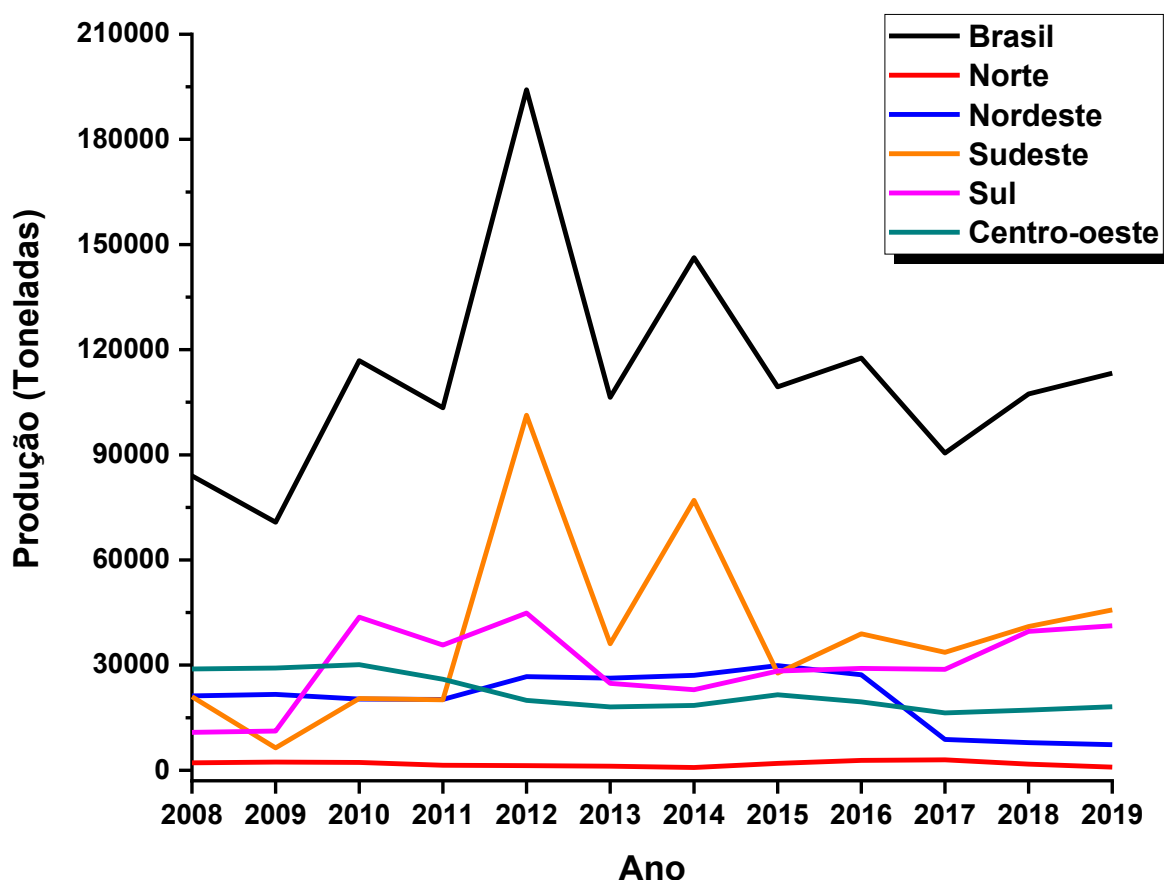
GRÁFICO 1 - ÁREA CULTIVADA COM PALMITO NO BRASIL E NAS REGIÕES NORTE, NORDESTE, SUDESTE, SUL E CENTRO-OESTE



FONTE: A autora (2020) modificado de IBGE – Produção Agrícola Municipal (2020).

A maior quantidade produzida de palmito no Brasil foi em 2012 com 194.138 toneladas, de 2013 a 2017 a produção decresceu e em 2018 voltou a crescer. As regiões Sul e Sudeste contribuíram com 146.158 toneladas no ano de 2012, e também tiveram queda em sua produtividade após esse período, em 2018 voltaram a recuperar a produção (GRÁFICO 2) (IBGE, 2020).

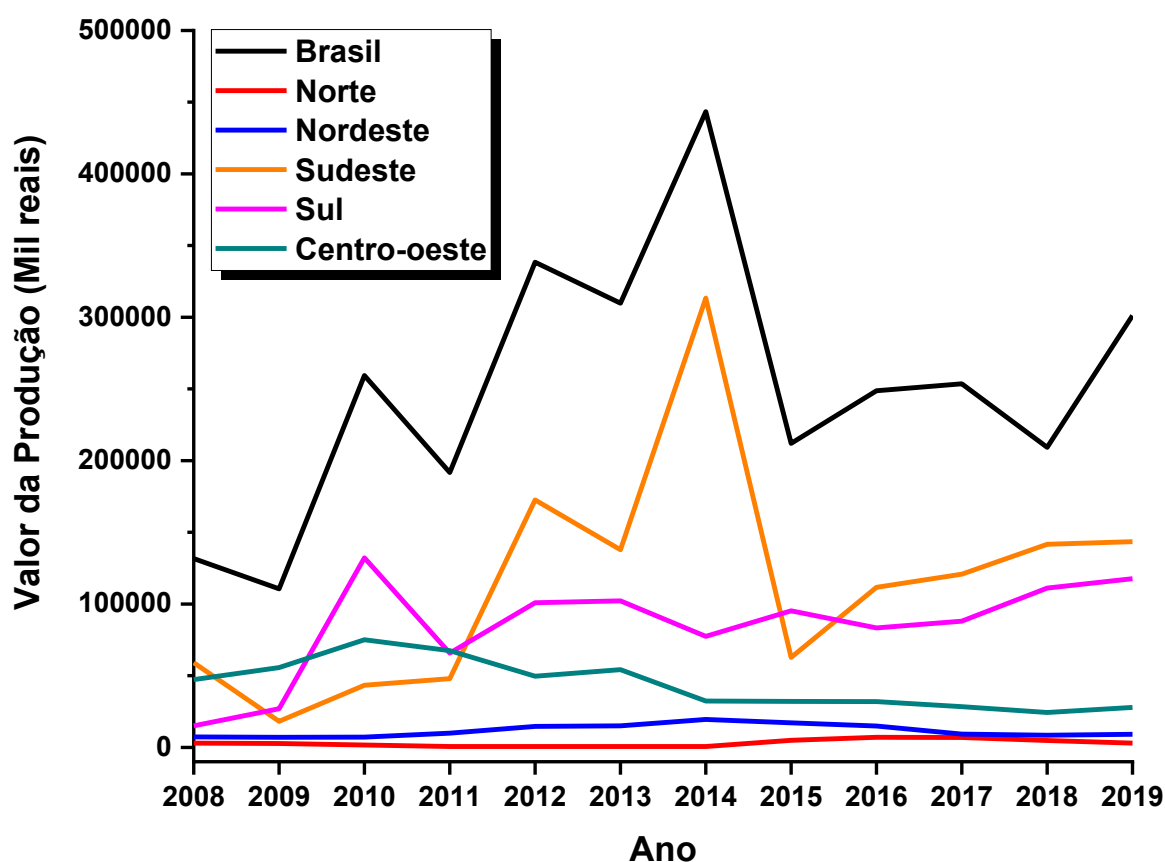
GRÁFICO 2 - PRODUÇÃO DE PALMITO NO BRASIL E NAS REGIÕES NORTE, NORDESTE, SUDESTE, SUL E CENTRO-OESTE



FONTE: A autora (2020) modificado de IBGE – Produção Agrícola Municipal (2020).

O valor total da produção de palmito no Brasil em 2019 foi de 301.133.000,00 de Reais, houve um aumento em 2014 com 443.330.000,00 Reais onde a região Sudeste foi a principal responsável com 313.369.000,00 de Reais, já a região Sul teve queda em 2014. Em 2019 a região Sul teve uma produção com valor de 117.677.000,00 de Reais, cerca de 39% do valor total produzido no país (GRÁFICO 3) (IBGE, 2020).

GRÁFICO 3 - VALOR DA PRODUÇÃO DE PALMITO NO BRASIL E NAS REGIÕES NORTE, NORDESTE, SUDESTE, SUL E CENTRO-OESTE



FONTE: A autora (2020) modificado de IBGE – Produção Agrícola Municipal (2020).

A área de cultivo da *B. gasipaes* no Brasil teve um crescimento importante, devido principalmente ao fato de ser uma espécie com capacidade de perfilhamento. Essa característica é uma das mais desejadas pelos produtores de palmito, pois aumenta a produção e dispensa a implantação de novos plantios por um longo período. A possibilidade de colheitas frequentes propicia renda constante e a diluição dos custos com a cultura (PENTEADO JUNIOR; SANTOS; NEVES, 2010).

2.4 CULTIVO DE PALMITO NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ

O Brasil é o maior consumidor, produtor e exportador mundial de palmito, é responsável por cerca de 95% de toda a produção consumida no mundo, sendo que 90% ainda é de origem extrativista. Proveniente principalmente da *Euterpe oleracea* Mart., o palmito do açazeiro (Amazônia) e da *Euterpe edulis* Mart., o palmito Juçara da (Mata Atlântica) (PICHELLI, 2015).

O litoral do estado do Paraná encontra-se em uma área de preservação da Mata Atlântica, o que restringe o desenvolvimento da agricultura na região. O extrativismo do palmito, principalmente a espécie *E. edulis* não é uma opção sustentável, pois a mesma encontra-se em processo de extinção, além da atividade ser ilegal (PICHELLI, 2017).

Devido a necessidade de encontrar novas alternativas para os agricultores familiares no litoral do Paraná, novos cultivos foram introduzidos, dentre eles a pupunheira. Características climáticas e do solo da região, a tradição dos agricultores em manejarem a palmeira *E. edulis* foram consideradas para as definições das novas atividades (BELLETTINI; CORRÊA JÚNIOR, 2010).

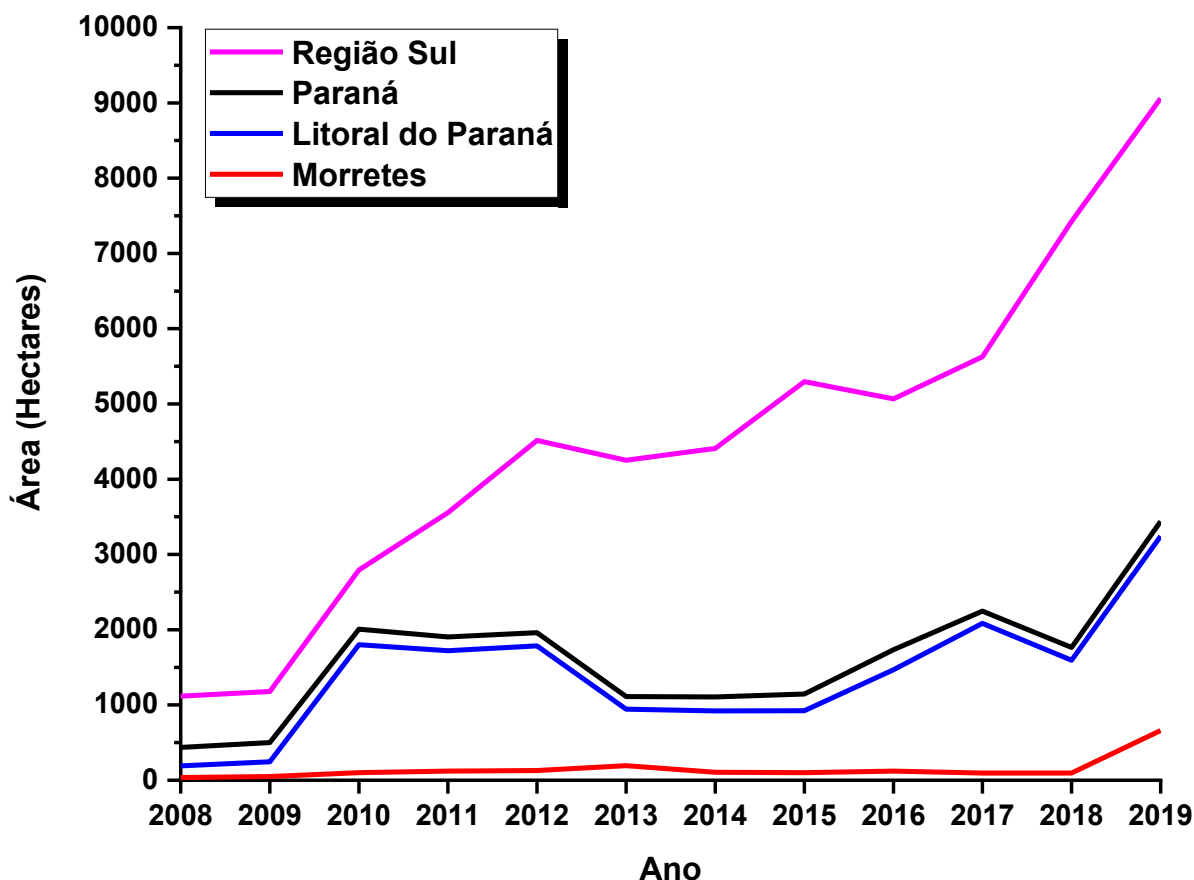
No início da década de 2000, o número de plantas de pupunheira na região do litoral do Paraná não passava de 100 mil, em 2010 esse número era acima de 2,5 milhões de mudas. Em 2017 havia cerca de 8,5 milhões de mudas plantadas em uma área de 1,65 mil hectares (PICHELLI, 2017).

O palmito pupunha começou a ser envasado da mesma forma que o palmito juçara, pois a população estava acostumada com o paladar deste último, o que não deu certo. A indústria, após ajustes, chegou a uma maneira de envase própria para o palmito pupunha que imediatamente agradou a população e assim promoveu sua aceitação e inserção no mercado. No ano de 2017 eram 13 agroindústrias de beneficiamento do palmito pupunha cultivado no litoral do Paraná (PICHELLI, 2017).

O estado do Paraná é dividido em 10 mesorregiões e possui 399 municípios segundo o INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES, 2012), dentre eles 51 são produtores de palmito e apenas 4 contribuem para a maior concentração da produção: Guaraqueçaba, Morretes, Guaratuba e Antonina, todos pertencentes a mesorregião metropolitana de Curitiba. No ano de 2010, o palmito representava cerca de 57,53% da produção total e 56,35% do valor total produzido (BITTENCOURT *et al.*, 2019).

A área colhida de palmito em 2019 foi de 3.440 hectares no estado do Paraná, sendo os municípios: Antonina, Guaraqueçaba, Guaratuba, Matinhos, Morretes e Pontal do Paraná localizados na região do litoral do estado os que mais contribuíram, juntos somaram 3.242 hectares (GRÁFICO 4). No município de Morretes foram 660 hectares de palmito colhido em 2019, representando 19,2% da área total colhida no estado do Paraná (IBGE, 2020).

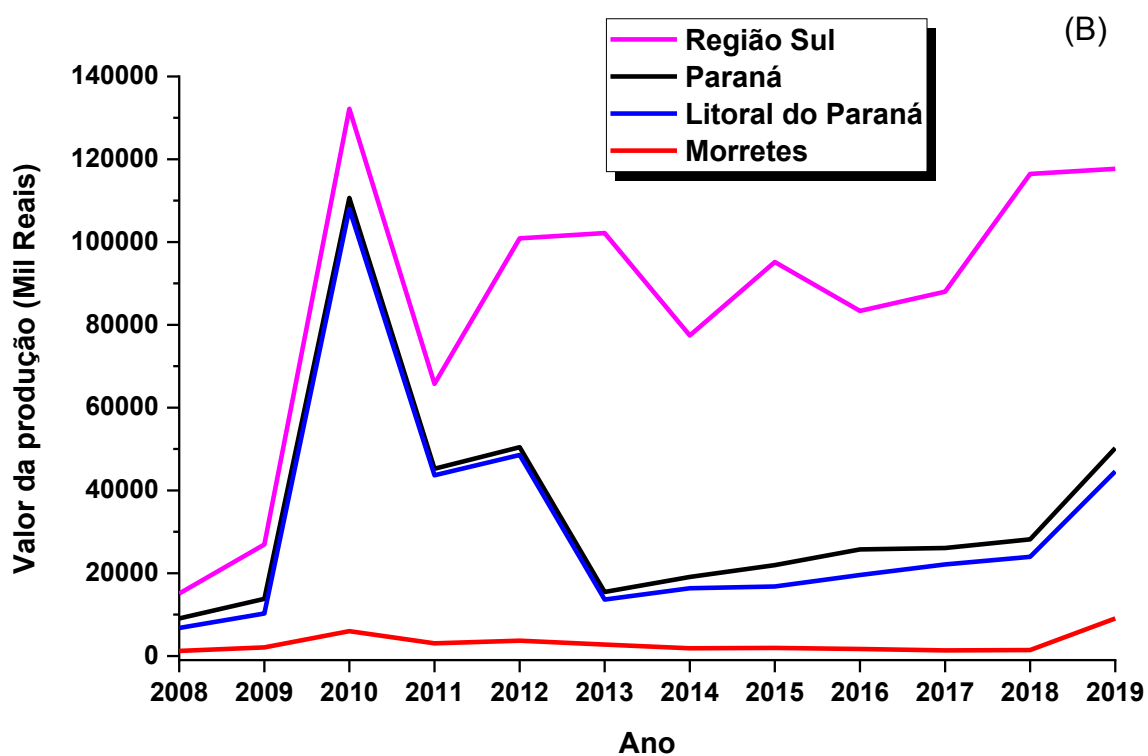
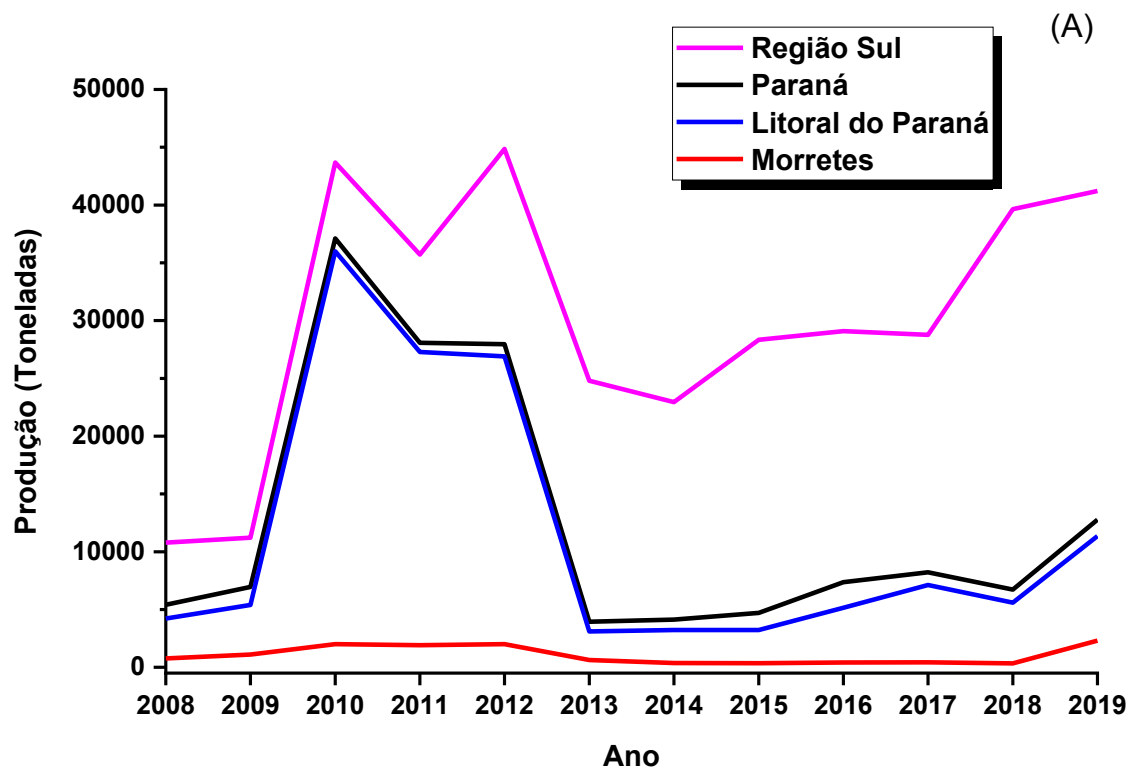
GRÁFICO 4 - ÁREA COLHIDA DE PALMITO NA REGIÃO SUL DO BRASIL, NO ESTADO DO PARANÁ, NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ E NO MUNICÍPIO DE MORRETES



FONTE: A autora (2020) modificado de IBGE – Produção Agrícola Municipal (2020).

A produção de palmito no estado do Paraná teve crescimento acentuado no ano de 2010, com posterior queda em 2013. No ano de 2019 a produção total do Paraná foi de 12.779 toneladas de palmito com valor total de 50.211.000,00 de Reais (GRÁFICO 5 (A) e (B)). A região do litoral do estado produziu 11.350 toneladas de palmito com valor de 44.605.000,00 de Reais, ou seja, 88,8% do total do estado do Paraná. O município de Morretes teve uma produção de 2.310 toneladas com valor de 9.078.000,00 de Reais representando 18,1% e 20,4% do estado e do litoral do Paraná (IBGE, 2020).

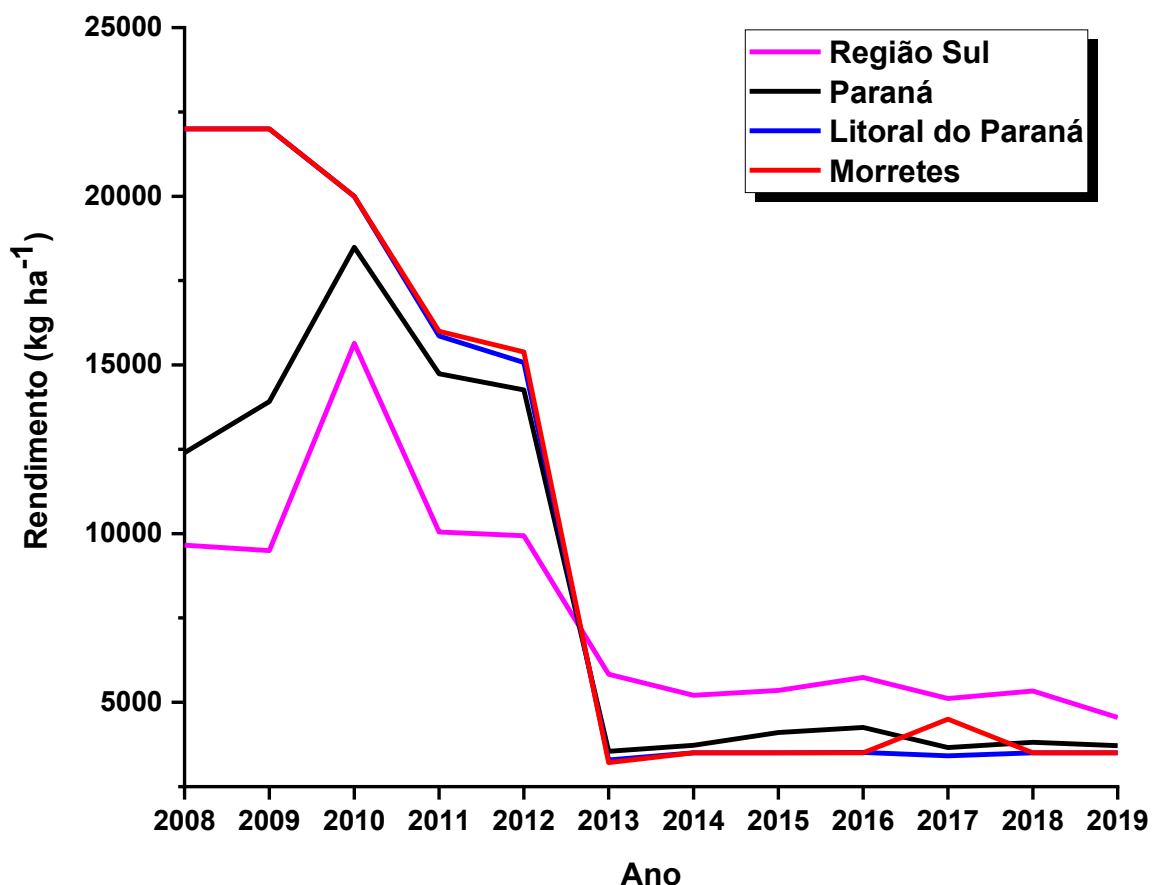
GRÁFICO 5 - PRODUÇÃO DE PALMITO NA REGIÃO SUL DO BRASIL, NO ESTADO DO PARANÁ, NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ E NO MUNICÍPIO DE MORRETES (A). VALOR DA PRODUÇÃO DE PALMITO NA REGIÃO SUL DO BRASIL, NO ESTADO DO PARANÁ, NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ E NO MUNICÍPIO DE MORRETES (B)



FONTE: A autora (2020) modificado de IBGE – Produção Agrícola Municipal (2019).

O rendimento médio de palmito produzido na região Sul foi de 15.639 kg ha⁻¹ em 2010, apresentando decréscimo no ano de 2011, porém com mais expressividade no ano de 2013, tendo em 2019 um rendimento médio de 4.549 kg ha⁻¹ (GRÁFICO 6). No Estado do Paraná o rendimento médio da produção de palmito em 2010 chegou a 18.490 kg ha⁻¹, em 2019 a produção teve um rendimento de 3.715 kg ha⁻¹, no município de Morretes o rendimento médio da produção, em 2019, foi de 3.500 kg ha⁻¹. (IBGE, 2020).

GRÁFICO 6 - RENDIMENTO DA PRODUÇÃO DE PALMITO NA REGIÃO SUL DO BRASIL, NO ESTADO DO PARANÁ, NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ E NO MUNICÍPIO DE MORRETES

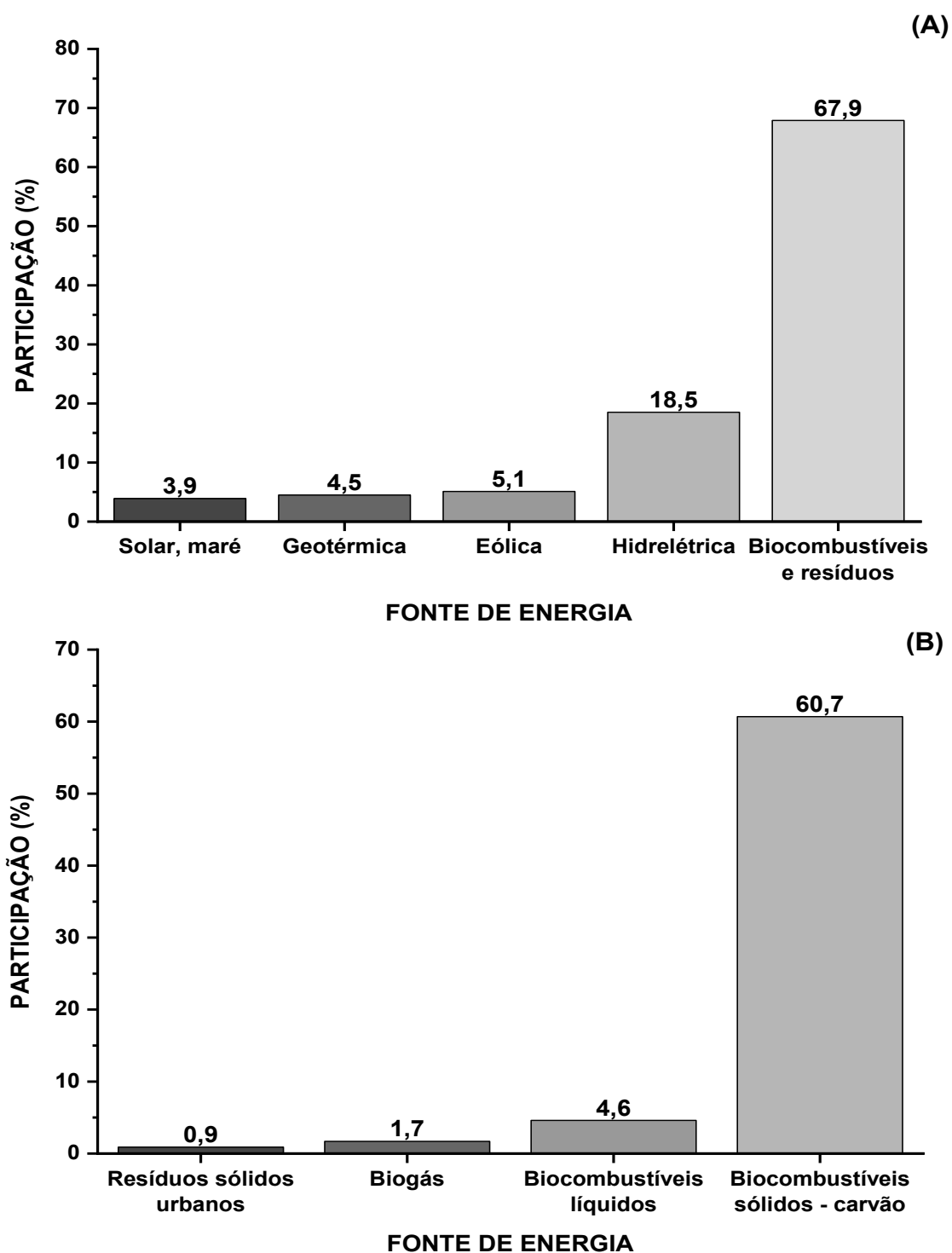


FONTE: A autora (2020) modificado de IBGE – Produção Agrícola Municipal (2020).

2.5 BIOENERGIA

O suprimento total de energia primária mundial em 2017 foi de 13.972 Mtep, dos quais 13,5% foram produzidos a partir de fontes renováveis de energia. O Brasil produziu 307,026 Mtep de energia primária, o que corresponde a 2,2% da energia produzida no mundo. A produção de energia de fontes renováveis no mundo foi de 1.956 Mtep, enquanto no Brasil essa produção foi de 127,2 Mtep equivalente a 7,1% das energias renováveis produzidas no mundo (BRASIL. MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA (MME), 2020). Os biocombustíveis e resíduos representam 67,9% da energia oriunda de fontes renováveis no mundo (GRÁFICO 7A), dentro deste percentual os biocombustíveis sólidos (carvão vegetal) foram a fonte de energia renovável com a maior representatividade 60,7% do suprimento global (GRÁFICO 7B), devido à sua ampla utilização em países em desenvolvimento para aquecimento e cocção. A fonte de energia hidrelétrica ficou com a segunda maior representatividade 18,5% entre as fontes renováveis, uma parcela menor é composta por fontes eólicas, geotérmicas, solares e marés, resíduos urbanos, biocombustíveis líquidos e biogás (GRÁFICO 7 (A) e (B)), segundo a *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY* (IEA, 2019).

GRÁFICO 7 - PARTICIPAÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO MUNDO (A); FONTES DE BIOCOMBUSTÍVEL QUE PARTICIPAM DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO MUNDO (B)

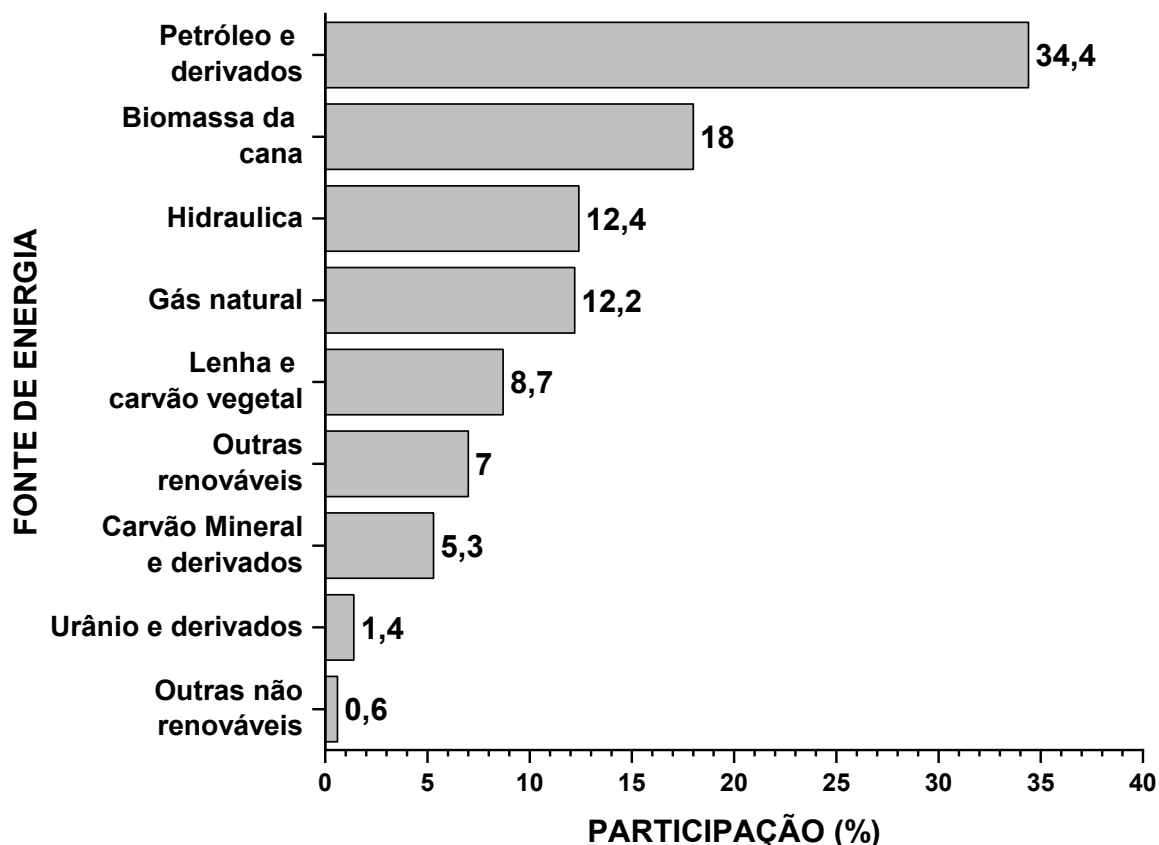


FONTE: A autora (2020) modificado de IEA – *International Energy Agency* (2019).

A oferta interna de energia no Brasil no ano de 2018 foi de 288,4 Mtep, as fontes não renováveis contribuíram com 54,7% e as fontes renováveis com 45,3%. Esta apresentou um excelente aumento em relação ao ano de 2017, onde sua

contribuição foi de 43,0% (GRÁFICO 8). O agregado “outras renováveis” (eólica, biodiesel, lixívia, biogás, resíduos de madeira, casca de arroz, capim elefante, dentre outros), foi o que teve a maior alta em 2018, com 13,6% (BRASIL. MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA (MME), 2020).

GRÁFICO 8 - OFERTA INTERNA DE ENERGIA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA, ANO 2019



FONTE: A autora (2020) modificado de MME – Balanço Energético Nacional (2020).

A bioenergia foi reconhecida como um componente significativo em muitos cenários futuros de energia. Muitos países em desenvolvimento dependem principalmente da biomassa para satisfazer suas necessidades energéticas. A substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis parece ser uma estratégia eficaz, não apenas para evitar uma futura crise energética eminente, mas também para reduzir as emissões de carbono dos combustíveis fósseis (ULLAH *et al.*, 2015).

O desenvolvimento de indústrias de biocombustíveis, o crescimento econômico e oportunidades para pequenos agricultores terá um aumento significativo, já que a produção, o processamento das culturas e o transporte ocorrem nas áreas rurais. As comunidades rurais podem obter renda com o processamento de

subprodutos de biocombustíveis, como produção de sabão, fertilizantes, ração para gado, e outros. As cooperativas rurais também podem participar de toda a cadeia de suprimentos, incluindo desenvolvimento e produção de matérias-primas, processamento, transporte e *marketing* (ULLAH *et al.*, 2015).

Biomassa lignocelulósica é um termo usado para designar todo material vegetal lenhoso ou fibroso, sendo composto por polímeros de lignina, celulose e hemicelulose interligados em uma matriz heterogênea. A massa de celulose e hemicelulose no material vegetal varia de acordo com as espécies, mas representa cerca de 50 a 75% da massa seca total, sendo o restante constituído por lignina. A celulose e a hemicelulose podem ser convertidas em açúcares através de uma série de processos termoquímicos e biológicos e eventualmente fermentadas em bioetanol. Uma grande variedade de resíduos agrícolas podem ser usados para a produção de biocombustíveis de segunda geração, esses biocombustíveis são geralmente considerados sustentáveis, pois usam resíduos da produção de alimentos e não competem com as culturas alimentares por terra (ULLAH *et al.*, 2015).

2.6 USOS TECNOLÓGICOS DA BIOMASSA DE PALMEIRAS

Diversas espécies de palmeiras são cultivadas ao redor do mundo com diferentes finalidades, como a produção de óleos, de frutos, de palmito e outros. O processo produtivo destas culturas gera material residual, o qual já é foco de estudo em alguns países, dessa maneira evidencia-se a importância de estudos com a biomassa residual da *B. gasipaes* para seu aproveitamento de forma eficiente e sustentável.

As palmeiras são geralmente cultivadas em regiões secas, tropicais e subtropicais. Um estudo sobre pirólise rápida de resíduos de tamareira (*Phoenix dactylifera* L.) em um reator de leito fluidizado borbulhante foi conduzido na *American University of Sharjah*. As características físico-químicas da matéria-prima (de cultivares da região de Sharjah nos Emirados Árabes Unidos), incluindo três partes anatômicas da planta: folhas, caules das folhas e cachos de frutos vazios foram analisadas e comparadas a outros tipos populares de biomassa. Esses componentes foram submetidos a pirólise rápida, em que o leito de areia de quartzo foi fluidizado com gás de nitrogênio pré-aquecido a 600 °C por 1 hora, para elevar a temperatura até 525 °C. Os produtos da pirólise rápida (bio-óleo e gases não condensáveis)

também foram analisados, o rendimento foi de 38,8% em bio-óleo (incluindo 10,4% de água de reação), 37,2% de biocarvão e 24,0% de gás não condensável. A eficiência geral de conversão de energia (razão entre o conteúdo de energia no produto e o da matéria-prima) foi de 87,0%, indicando potencial de converter os resíduos da tamareira em energia e eliminar o impacto ambiental e o custo negativo associado à geração de resíduos (MAKKAWI *et al.*, 2019).

Os resíduos da tamareira (*Phoenix dactylifera* L), são uma fonte atraente de energia, pois são renováveis estão disponíveis em abundância e não competem com as culturas alimentares. Processos de pirólise e combustão podem ser métodos eficientes de conversão térmica dessa biomassa. O comportamento térmico de diferentes resíduos de tamareira: pinas, ráquis, estipe, caule do cacho de frutos e sementes foi investigado via análise termogravimétrica, em atmosfera de nitrogênio e ar sintético, a fim de avaliar sua utilidade para a produção de energia. Os resíduos foram provenientes de cultivos em Tozeur, Tunísia. Entre as amostras estudadas, a biomassa do estipe foi o material mais reativo tanto sob pirólise quanto sob atmosfera oxidativa, enquanto a semente foi o combustível menos reativo. A energia de ativação está associada a fase de desvolatilização em ambas as atmosferas (inerte e oxidativa), foi verificado que a mudança na atmosfera de nitrogênio para ar aumentou o valor da energia de ativação para as diferentes biomassas de tamareira. Os dados obtidos no estudo, as propriedades das biomassas juntamente com o comportamento térmico sob atmosfera inerte e oxidativa, bem como os parâmetros cinéticos, permitiram a comparação dos resultados obtidos com outros biocombustíveis e podem ser úteis para o projeto de sistemas de processamento para produções de energia (EL MAY *et al.*, 2012).

A introdução de micropartículas do estipe de *Bactris gasipaes* como reforço em uma matriz polimérica com polietileno de alta densidade (HDPE) foi avaliada, em seu comportamento mecânico. As micropartículas foram colocadas no HDPE através de um processo de extrusão para produzir biocompósitos contendo 10, 20, 25 e 30% em massa de micropartículas. Além dos testes mecânicos, foi realizada análise fractográfica para entender o mecanismo de falha nos biocompósitos sob cargas de impacto dinâmico e balístico. Os resultados indicam as propriedades do HDPE são aprimoradas com o reforço das micropartículas, os biocompósitos contendo 25% apresentaram maior resistência, rigidez, resistência ao impacto balístico e capacidade de absorção de energia de impacto. Conclui-se que é um método promissor para

desenvolver biocompósitos com capacidade aprimorada para suportar a carga dinâmica de impacto e absorver energia de impacto (HARO; SZPUNAR; ODESHI, 2018).

A grande quantidade de resíduos gerados na agroindústria de beneficiamento da palmeira pupunha para palmito e seu conteúdo de celulose ($34 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$), motivaram o estudo onde as bainhas externas foram usadas para a produção de nanocelulose através de retificação ultrafina. Foram aplicados protocolos combinando diferentes deslignificações químicas com intensidade de desfibrilação (10 e 20 ciclos) e avaliada sua influência sobre algumas propriedades e características das nanofibras. Em todos os protocolos aplicados, foi possível produzir celulose em nível nanométrico (larguras $\sim 100 \text{ nm}$), com alto índice de cristalinidade (49,8 - 54,5%) e grande estabilidade térmica. Os resultados evidenciaram que foi possível produzir nanocelulose com características técnicas adequadas a partir de resíduos de pupunha (SZLAPAK *et al.*, 2019).

Resíduos gerados no processo produtivo do óleo de palma, são um recurso promissor na produção de biomassa para biocombustíveis através de tecnologias de conversão termoquímica. Em estudo realizado em Sabah (Malásia) utilizando casca da semente de *Elaeis guineenses* Jacquin, foram analisadas as diferenças no comportamento de degradação térmica e cinética utilizando análise termogravimétrica e ftir, em atmosfera inerte (nitrogênio) e oxidativa (ar sintético). Foi observada diferença notável no comportamento de degradação térmica e cinética entre as atmosferas. A TG em ar sintético apresentou perdas de massas mais acentuadas, em todos os três estágios, do que em atmosfera inerte. Altas quantidades de H_2O , CO_2 e CO foram observadas em atmosfera oxidativa, devido a reação de combustão, enquanto baixas quantidades de CH_4 foram atribuídos a diluição de H_2O , CO_2 e CO com o ar, comparativamente sob a atmosfera de nitrogênio. A distribuição de energia de ativação aparente junto com a taxa de conversão, foi uma expressão abrangente dos comportamentos da pirólise, embora não observada em ar sintético (MA *et al.*, 2018).

A produção de biochar a partir de várias fontes de biomassa tem gerado grande interesse mundial, desde que sua adição a solos agrícolas degradados melhorou a fertilidade e a produção de biomassa, além de mitigar as mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono no solo e a redução nas emissões de gases de efeito estufa. Muitas pesquisas foram realizadas para converter a biomassa

de dendê, já que é gerada grande quantidade de biomassa no processo produtivo do óleo de palma, em produtos de valor agregado, mas nenhum, exceto o biochar, chegou perto de ser rotulado como produto de carbono negativo. Em uma revisão sobre o potencial de produção e aplicação do biochar produzido com biomassa de dendê na Malásia, considera-se o processo termoquímico com forte adaptabilidade aos recursos de biomassa, principalmente com a abundante disponibilidade deste material no país. Os projetos de conversão e sequestro de carbono têm o potencial de contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a produção de biochar a partir de biomassa de dendê oferece benefícios promissores, incluindo a geração de eletricidade renovável, biocombustíveis líquidos, biocombustíveis gasosos, grandes quantidades de calor ou vapor de baixa pressão e o potencial de uma retirada líquida de dióxido de carbono da atmosfera (KONG *et al.*, 2014).

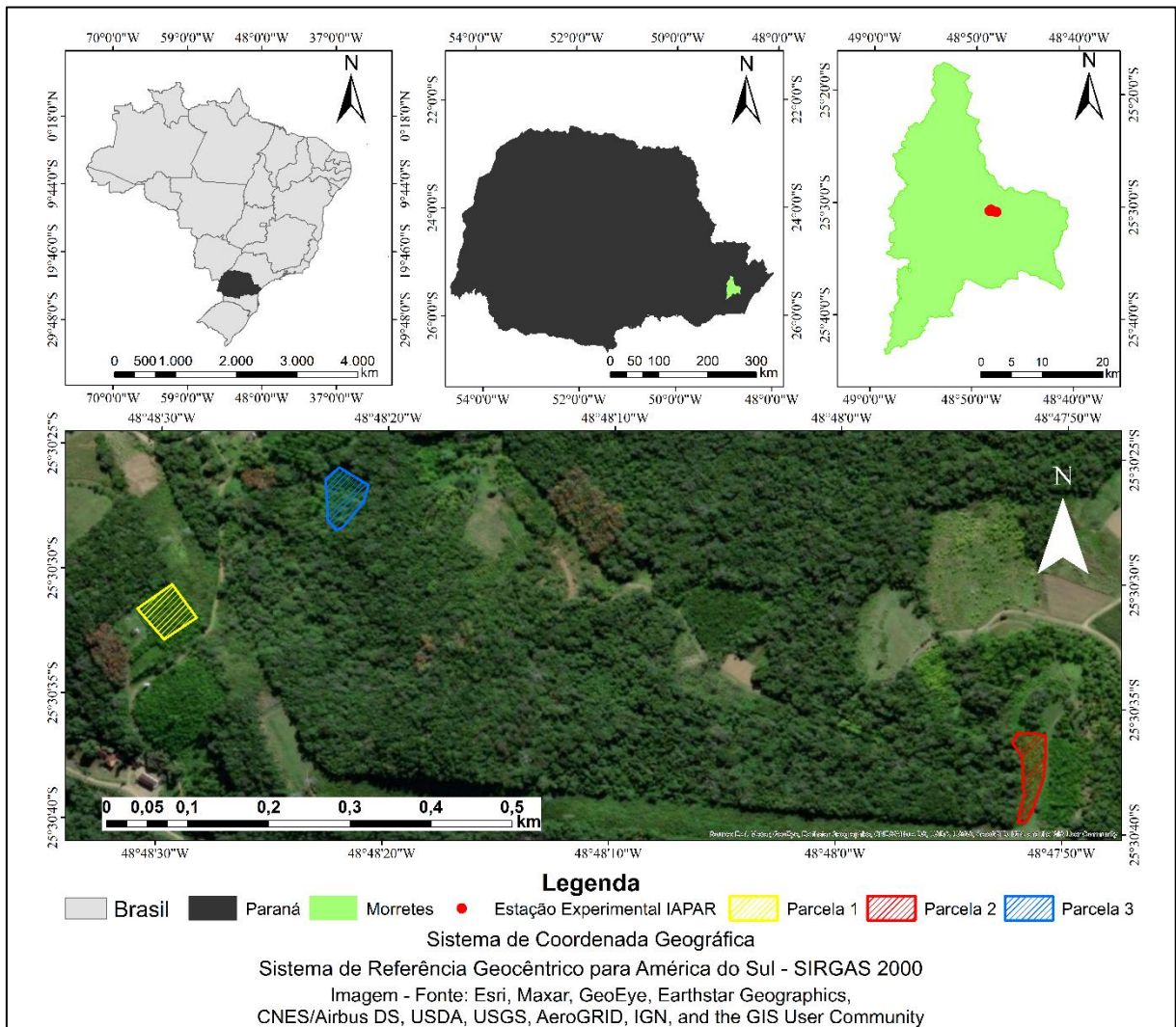
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO E ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido na estação experimental do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná - IAPAR – EMATER (IDR – Paraná), coordenadas 25°30'36" S e 48°48'37" W, no município de Morretes, pertencente a mesorregião geográfica metropolitana de Curitiba, Estado do Paraná. Segundo a classificação de Köppen a região apresenta clima Cfa (quente e temperado), com temperatura média anual de 21,3 °C e pluviosidade média anual de 1.984 mm.

Na estação experimental, três locais com pupunheira para a de produção de palmito foram selecionados (Locais 1, 2 e 3) para a realização deste estudo. A seleção destes locais se deu em função da época do plantio, das características da localização específica e da disponibilidade da instituição para ceder a área (FIGURA 4). O local 1 possui área total de 3.228 m², a implantação do cultivo de *B. gasipaes* ocorreu na primavera entre os meses de setembro e outubro do ano de 2005, com espaçamento de 1 x 2 m e está situado a 46 m de altitude com insolação direta e relevo ondulado (FIGURA 5 (A)). O local 2 possui área total de 3.314 m², a implantação do cultivo de *B. gasipaes* ocorreu no outono no mês de maio do ano de 2005, com espaçamento de 1 x 1 m e está situado a 38 m de altitude com insolação direta e relevo forte ondulado (FIGURA 5 (B)). O local 3 possui área total de 2.645 m², a implantação do cultivo de *B. gasipaes* ocorreu no outono no mês de abril do ano de 2001, com espaçamento de 1 x 2 m, está situado a 26 m de altitude, há sombreamento na área devido à vegetação existente no entorno do plantio e relevo ondulado (FIGURA 5(C)).

FIGURA 4 - ÁREA DE ESTUDO



Elaborado por Rudson Silva Oliveira (2020).

FIGURA 5 - PARCELA P1 (A), PARCELA P2 (B) E PARCELA P3 (C)



FONTE: A autora (2020).

3.2 INVENTÁRIO E COLETA DO MATERIAL

Nos locais 1,2 e 3 foram instaladas duas parcelas quadradas de 10 x 10 m (100 m²), deixando duas linhas da bordadura e com espaço de 10 metros entre as

parcelas. As plantas de pupunheira formam touceiras, já que é característica da espécie possuir rebrotas, devido a este fator foi necessário definir metodologia para mensuração dos indivíduos.

Para a seleção dos indivíduos o limite mínimo de 10 cm e o máximo de 16 cm de diâmetro a 10 cm de altura em relação ao solo, foi definido para que as plantas fossem mensuradas. As demais palmeiras da touceira entraram apenas na contagem não sendo medidas.

As plantas encontradas nas parcelas instaladas foram todas identificadas, independentemente de serem mensuradas ou não (FIGURA 6 (A)). As variáveis medidas foram diâmetros a 10 e a 30 cm de altura em relação ao solo, altura até a inserção da folha flecha (folha que ainda não abriu) (FIGURA 6(B)), e o número de perfilhos em cada touceira.

FIGURA 6 - IDENTIFICAÇÃO DAS PLANTAS (A) E INSERÇÃO DA FOLHA FLECHA (B)



FONTE: A autora (2020).

Com os dados do inventário foi calculada a intensidade amostral admitindo limite de erro de 5% e probabilidade de 95%. Os resultados foram favoráveis a amostragem realizada, não necessitando a mensuração de mais indivíduos. As plantas foram divididas em três classes de diâmetro médio (média dos diâmetros a 10 cm e a 30 cm de altura do solo), e selecionadas aleatoriamente três por classe, sendo nove palmeiras por plantio, totalizando vinte e sete plantas abatidas.

As plantas foram cortadas com auxílio de motosserra para melhor aproveitamento do estipe, o corte foi realizado o mais próximo do solo possível FIGURA 7 (A). Posteriormente ao abate, a pupunheira foi separada em estipe, palmito com bainha e folhas FIGURAS 7 (B), 7 (C) e 7 (D).

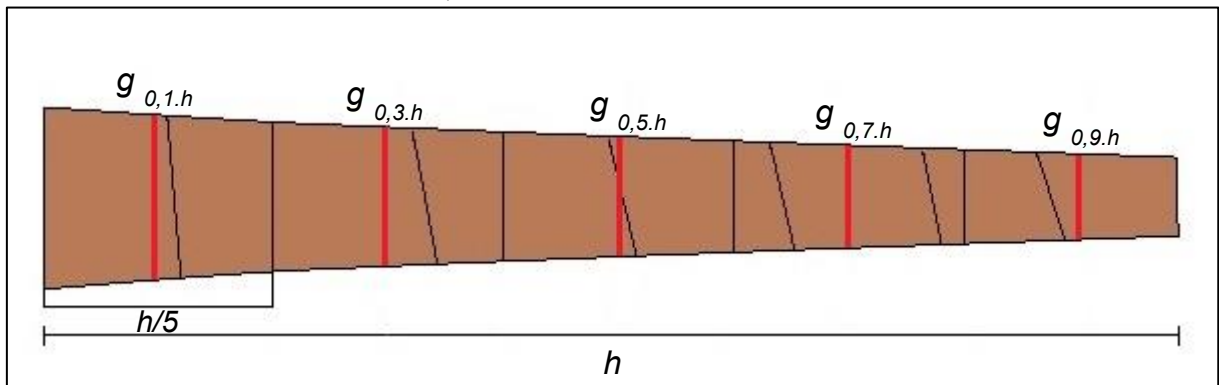
FIGURA 7 - TOCO APÓS ABATE (A), ESTIPE CORTADA (B), FOLHAS (C) E PALMITO (D)



FONTE: A autora (2020)

Os estipes foram cubados pelo método de Hohenadl (FIGURA 8), que consiste na divisão do tronco em cinco seções de iguais comprimentos, sendo o volume calculado a partir de apenas uma medida (d_i ou c_i) no centro de cada seção (EQUAÇÃO 1).

FIGURA 8 - ESQUEMA PARA CUBAGEM POR HOHENADL



FONTE: A autora (2020).

$$V = \frac{h}{5} (g_{0,1} + g_{0,3} + g_{0,5} + g_{0,7} + g_{0,9}) \quad (1)$$

Em que:

V = Volume (m^3);

h = Altura total (m);

g_i = Áreas transversais calculadas a 10, 30, 50, 70, e 90% da altura total (m^2).

Os componentes estipe, bainha e folha foram pesados em balança digital com capacidade para 40 kg (FIGURA 9 (A)). Após a pesagem, foram selecionadas uma seção do estipe, o palmito com as bainhas e uma folha de cada planta para realização das análises físicas, químicas e energéticas. Os componentes foram acondicionados em sacos de aniagem para o transporte até o Laboratório de Energia de Biomassa da UFPR (FIGURA 9 (B)).

FIGURA 9 - PESAGEM DOS COMPONENTES DA *Bactris gasipaes* (A) E AMOSTRAS PARA ANÁLISE EM LABORATÓRIO (B)

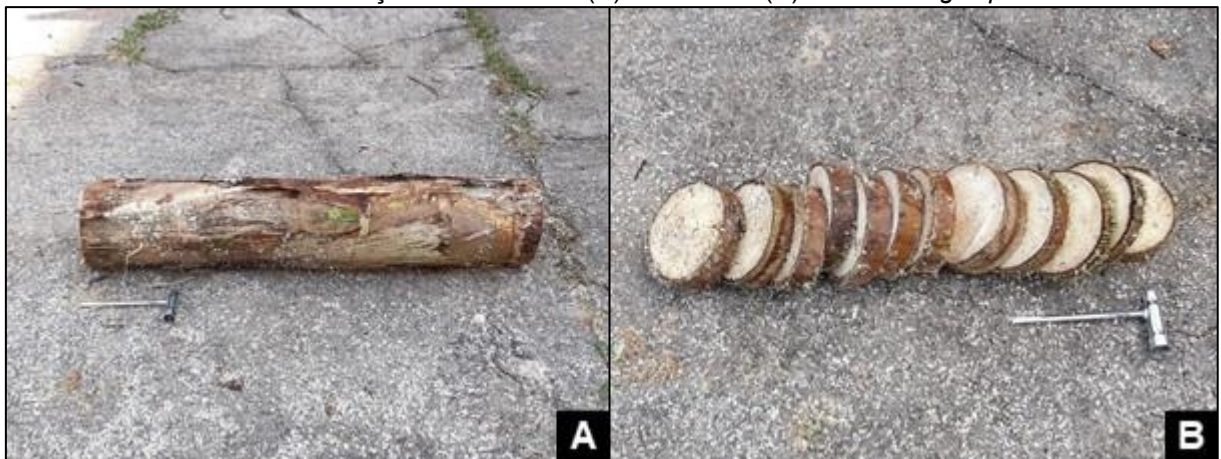


FONTE: A autora (2020).

3.3 PREPARAÇÃO DO MATERIAL E ANÁLISES FÍSICAS

A seção do estipe foi seccionada em discos, com auxílio de motosserra, sendo descartados os discos dos topos (FIGURA 10).

FIGURA 10 – SEÇÃO DO ESTIPE (A) E DISCOS (B) DE *Bactris gasipaes*



FONTE: A autora (2020).

As bainhas que recobriam a secção do estipe foram separadas do palmito no laboratório (FIGURA 11).

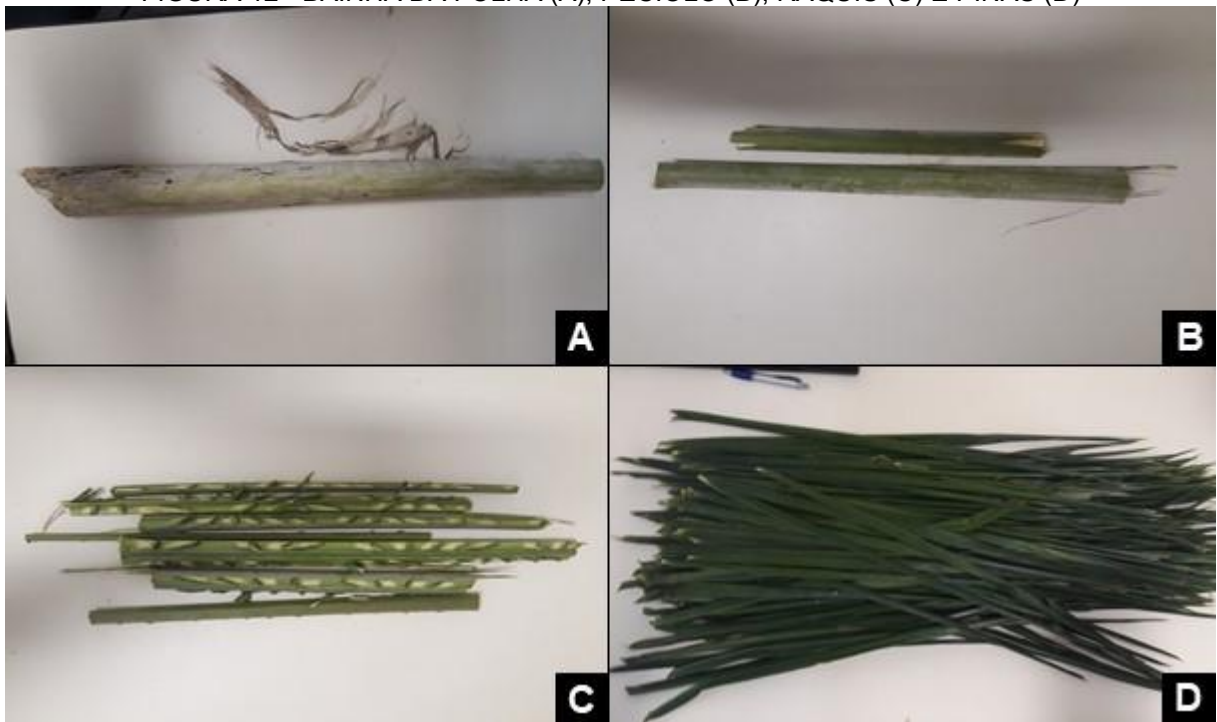
FIGURA 11 – SEPARAÇÃO DO PALMITO DAS BAINHAS: PALMITO COM BAINHA (A), BAINHA (B) E PALMITO (C)



FONTE: A autora (2020).

Ressalta-se que neste trabalho o palmito não foi avaliado, somente a biomassa residual, estipe, bainha e folha. A folha da pupunheira é composta por bainha, pecíolo, ráquis e pinas, essas partes foram separadas e pesadas individualmente (FIGURA 12).

FIGURA 12 - BAINHA DA FOLHA (A), PECÍOLO (B), RÁQUIS (C) E PINAS (D)



FONTE: A autora (2020).

O teor de umidade e o teor de massa seca das amostras foram determinados conforme a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 14929 (ABNT, 2017).

A densidade básica dos discos do estipe foi determinada pelo método da balança hidrostática, realizada de acordo com a norma NBR 11491 (ABNT, 2003)

adaptada. Consistiu na determinação do volume verde, mergulhando o disco preso a uma haste até a submersão completa. Posteriormente o disco foi seco em estufa a 105 ± 2 °C até a massa constante.

A densidade básica foi calculada pela (EQUAÇÃO 2).

$$db = \frac{m_3}{m_2 - m_1} \quad (2)$$

Em que:

db = Densidade básica (g cm^{-3});

m_1 = Massa do recipiente com água (g);

m_2 = Massa do recipiente com água + o disco submerso (g);

m_3 = Massa da amostra seca em estufa (g).

A biomassa seca de cada componente, por planta, foi obtida multiplicando-se a biomassa (kg) pesada em campo pelo percentual de massa seca da amostra, determinada em laboratório, segundo a (EQUAÇÃO 3). A biomassa seca total por planta foi calculada pela soma da biomassa seca dos componentes.

$$Bsc_{ij} = bio_{ij} . ms_{ij} \quad (3)$$

Em que:

Bsc_{ij} = Biomassa seca do componente i da planta j (kg);

bio_{ij} = Massa do componente i da planta j pesada em campo (kg);

ms_{ij} = Porcentagem de massa seca do componente i da planta j da amostra (%).

3.4 AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS

A estimativa da biomassa seca total foi realizada a partir de modelos matemáticos ajustados, para tal foram utilizados 14 modelos estatísticos selecionados de acordo com (FONTOURA *et al.*, 2017; ARAÚJO *et al.*, 2018) (TABELA 1). Para realização dos ajustes foram utilizadas vinte e sete plantas amostradas nos três (3) locais, utilizando-se o *Software* Microsoft Excel 365. A seleção das variáveis independentes utilizadas nos modelos, foi realizada através de análise de correlação

pelo método de Pearson, de acordo com os resultados obtidos as variáveis: altura até a inserção da folha flecha (hl), diâmetro a 30 cm de altura em relação ao solo (d_{30}) e a densidade aparente básica (db) foram selecionadas.

TABELA 1 - MODELOS ESTATÍSTICOS TESTADOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA TOTAL

Nº	Autor	Modelo
1	Linear	$y = \beta_0 + \beta_1(hl) + e$
2	Trorey	$y = \beta_0 + \beta_1(hl) + \beta_2(hl^2) + e$
3	Kopecky-Gehrhardt	$y = \beta_0 + \beta_1(hl^2) + e$
4	Henricksen	$y = \beta_0 + \beta_1(1/hl^2) + e$
5	Stoffels	$y = \beta_0 + \beta_1(\ln(hl)) + e$
6	Curtis	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1(\ln(hl)) + e$
7	Schumacher-Hall	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1(1/hl) + e$
8	Spurr	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1(\ln(hl)) + \beta_2(\ln(d_{30})) + e$
9	Meyer	$y = \beta_0 + \beta_1(hl^2 \cdot d_{30}) + e$
10	Stoate	$y = \beta_0 + \beta_1(hl) + \beta_2(hl^2) + \beta_3(hl \cdot d_{30}) + \beta_4(hl^2 \cdot d_{30}) + \beta_5(d_{30}) + e$
11	Sanquetta	$y = \beta_0 + \beta_1(hl^2) + \beta_2(d_{30}^2) + \beta_3(hl^2 \cdot d_{30}) + e$
12	Naslund	$y = \beta_0 + \beta_1(hl^2) + \beta_2(hl^2 \cdot d_{30}) + e$
13	Chave 1	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(hl) + \beta_2 \ln(d_{30}) + \beta_3 \ln(db) + e$
14	Modelo 1	$y = \beta_0 + \beta_1(hl) + \beta_2(db) + \beta_3(d_{10})$

FONTE: A autora (2020).

O ajuste utilizando o método *Stepwise* (Modelo 1) foi realizado utilizando-se as variáveis diâmetro a 10 e 30 cm de altura em relação ao solo (d_{10} , d_{30}), diâmetro médio (d_m), altura até a inserção da folha flecha (hl) e densidade aparente básica (db). A seleção dos melhores modelos foi baseada nos coeficientes de determinação ajustado (R^2_{aj}), os erros padrão da estimativa (S_{xy}), valor de significância do teste F_{calc} a 5% de probabilidade de erro, significância dos coeficientes de regressão (β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 e β_5), pelo teste t e análise gráfica dos resíduos padronizados.

Para obter os valores da variável de interesse biomassa seca total (Bst), procedeu-se a operação inversa ao logaritmo neperiano para os modelos logarítmicos, aplicando-se o fator de correção de discrepância logarítmica (MEYER, 1941) (EQUAÇÃO 4). Com a correção das estimativas dos modelos logarítmicos, obtém-se novos valores dos coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aj}) e erros padrão da estimativa (S_{xy} %), assim esses modelos podem ser comparados com os modelos aritméticos.

$$FCM = e^{0,5 \cdot S_{xy}^2} \quad (4)$$

Em que:

FCM = Fator de correção de discrepância logarítmica de Meyer;

S_{xy} = Erro padrão da estimativa.

A validação dos modelos ajustados foi realizada utilizando 16 indivíduos de *B. gasipaes*, oriundas de outra parcela na área da Estação Experimental do –IDR - Paraná. Estas plantas foram coletadas e utilizadas em um estudo prévio para a elaboração deste trabalho. A partir dos dados de inventário desta área, um novo conjunto de dados foi obtido, para os quais foram calculadas novas estatísticas de precisão e comparadas com as estatísticas de ajuste, assim como a aplicação do teste do qui-quadrado (χ^2) ao nível de 95% de probabilidade conforme (EQUAÇÃO 5).

$$\chi^2_{calculado} = \sum \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i} \quad (5)$$

Em que:

$\chi_{calculado}$ = Valor do qui-quadrado calculado;

y_i = Variável dependente valor observado;

\hat{y}_i = Variável dependente valor estimado.

O valor do qui-quadrado calculado foi comparado com o valor tabelado, se χ^2 calculado for inferior ao χ^2 tabelado, a hipótese de que o modelo ajustado possui acurácia para ser utilizado para cálculo de estimativas é aceito.

3.5 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E ANÁLISES QUÍMICAS E ENERGÉTICAS

3.5.1 Preparação do material

A estipe, a bainha e as quatro partes da folha (bainha, pecíolo, ráquis e pinas) de cada planta foram trituradas em moinho analítico da marca IKA modelo A11. Após a moagem, as partes da folha foram pesadas proporcionalmente à sua participação na folha composta e misturadas para preparação da amostra, obtendo uma composição da folha da pupunheira que representa a realidade (FIGURA 13).

Para as análises química imediata e poder calorífico superior foram utilizadas 27 plantas divididas em 3 componentes, totalizando 81 amostras. Para a análise macromolecular foram utilizadas amostras compostas das 27 plantas, ou seja, uma amostra de cada classe de diâmetro (3) para cada componente (3) em cada plantio (3), totalizando 27 amostras.

FIGURA 13 - COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA DE FOLHA: BAINHA (A), PECÍOLO (B), RÁQUIS (C) E PINAS (D)



FONTE: A autora (2020).

3.5.2 Análise química imediata

A análise química imediata foi realizada de acordo com procedimentos padronizados especificados pela norma da *American Society for Testing and Materials* ASTM D1762–84 (ASTM, 2013a). O teor de material volátil (MV) foi determinado através do aquecimento da amostra seca (3,0 g) em um cadinho de porcelana com tampa previamente calcinado e tarado, sem contato com o ar ambiente. O cadinho foi colocado sobre a porta da mufla a 900 °C por 3 minutos, após esse tempo foi colocado dentro do forno por 7 minutos com a porta fechada. O cadinho foi retirado da mufla e deixado resfriar um pouco sobre um material resistente ao calor. A tampa do recipiente foi removida e depois foi armazenado em dessecador até a temperatura ambiente. O teor de material volátil foi calculado pela (EQUAÇÃO 6).

$$MV \% = \frac{(A - B)}{A} \cdot 100 \quad (6)$$

Em que:

MV = Material volátil (%);

A = Amostra seca a 105 °C (g)

B = Amostra submetida a 900 °C (g).

O material resultante da determinação do teor de material volátil foi submetido ao processo de combustão. Nesta etapa da análise química imediata, o material obtido no experimento anterior foi colocado em um forno mufla a 700 °C durante 6 horas. O cadinho contendo as cinzas foi retirado da mufla e deixado resfriar dentro de um dessecador até a temperatura ambiente. Após foi pesado e o teor de cinzas (CZ) foi calculado pela (EQUAÇÃO 7). O teor de carbono fixo (CF) foi determinado por diferença (EQUAÇÃO 8).

$$CZ \% = \frac{C}{A} \cdot 100 \quad (7)$$

$$CF \% = 100 - (MV \% + CZ \%) \quad (8)$$

Em que:

CZ = Teor de cinza (%);

A = Amostra seca a 105 °C (g);

C = Massa do resíduo (g);

CF = Carbono fixo (%).

3.5.3 Análise química macromolecular

O material seco em estufa à 60 °C foi moído e peneirado para obtenção de amostra com granulometria de 60 *mesh*. Três diferentes sistemas de solventes foram utilizados. Na primeira etapa, a amostra (1,000 g) foi colocada em envelope de papel filtro, sendo inserida no sistema de extração Soxhlet e utilizando 200 mL da solução de Etanol:Tolueno (1:2) (v/v) por um período de oito horas (FIGURA 17). O solvente foi removido e a amostra foi seca em estufa. Na segunda etapa, a amostra foi inserida no sistema de extração Soxhlet e utilizando 200 mL de Etanol (95%) por um período de seis horas. O solvente foi removido e a amostra foi seca em estufa, estas etapas foram baseadas na norma D1107-96 (ASTM, 2013b).

Na última etapa de extração foi realizada a solubilidade em água quente. A amostra foi transferida para um Erlenmeyer de 250 mL e adicionado 100 mL de água destilada, permanecendo em banho-maria por um período de 3 horas a 96 °C. O material foi filtrado em cadinho de vidro sinterizado e seco em estufa (105 °C) até massa constante. Os resultados do teor de extrativos foram expressos em base seca.

A hidrólise ácida foi realizada para a determinação dos teores de lignina insolúvel (LI) e lignina solúvel (LS). Na primeira etapa, a determinação do teor de lignina insolúvel em ácido foi realizada através da norma T222 om-15 da *Technical Association Of The Pulp And Paper Industry* (TAPPI), 2015. As amostras livres de extrativos (duas repetições de 200 mg) foram pesadas em Erlenmeyer de 250 mL e 3,0 mL de H₂SO₄ 72% foram adicionados em cada amostra. As amostras foram mantidas em temperatura ambiente por 2 h e agitadas a cada 15 minutos com um bastão de vidro. As amostras foram diluídas para uma concentração de ácido sulfúrico a 3% adicionando 115 mL de água destilada e colocadas em banho-maria a 96 °C por 4 horas. Após esfriamento até à temperatura ambiente, o hidrolisado foi filtrado através de cadinhos de vidro sinterizado para recolher a lignina insolúvel (LI) em

ácido, que foram secas a 105 °C até massa constante, a qual foi determinada pela (EQUAÇÃO 9).

$$LI \% = \frac{m_h}{m_s} \cdot 100 \quad (9)$$

Em que:

LI = Lignina insolúvel (%);

m_h = Massa do hidrolisado (g);

m_i = Massa seca inicial (g).

As soluções dos hidrolisados foram reservadas para a determinação de lignina solúvel (LS). Os sólidos foram lavados com água destilada até pH neutro, a qual foi determinada utilizando a solução do hidrolisado de acordo com a norma NBR 16550 (ABNT, 2018). O espectrofotômetro UV-vis Shimadzu UV-1800 foi utilizado para determinar as absorvâncias nos comprimentos de onda (215 e 280 nm), a (EQUAÇÃO 10) foi utilizada para o cálculo da concentração de lignina solúvel no hidrolisado (C_{LS}) e a (EQUAÇÃO 11) para calcular o teor de lignina solúvel (LS).

$$C_{LS} = \left[\frac{(4,53 \cdot A_{215}) - A_{280}}{300} \right] \cdot fd_{LS} \quad (10)$$

Em que:

C_{LS} = Concentração de lignina solúvel no hidrolisado (g L⁻¹);

A_{215} = Valor da absorvância no comprimento de onda 215 nm;

A_{280} = Valor da absorvância no comprimento de onda 280 nm;

fd_{LS} = Fator de diluição da alíquota do hidrolisado.

$$LS = \left(\frac{C_{LS} \cdot V}{M_{lex}} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{Et}{100} \right) \right] \cdot 100 \quad (11)$$

Em que:

LS = Lignina solúvel (%);

C_{LS} = Concentração de lignina solúvel no hidrolisado (g L⁻¹);

V = Volume do hidrolisado (L)

M_{lex} = Massa da amostra livre de extrativos (g);

E_t = Teor de extrativos (%).

A lignina total foi calculada a partir da soma da lignina insolúvel e da lignina solúvel, conforme a (EQUAÇÃO 12).

$$LT = LI + LS \quad (12)$$

Em que:

LT = Lignina total (%);

LI = Lignina insolúvel (%);

LS = Lignina solúvel (%).

A holocelulose foi calculada a partir da diferença dos teores de extrativos totais, de lignina total e cinzas, conforme a (EQUAÇÃO 13).

$$HOLO = 100 - (LT + EXT + CZ) \quad (13)$$

Em que:

$HOLO$ = teor de holocelulose (%);

LT = teor de lignina total (%);

EXT = teor de extrativos totais (%);

CZ = teor de cinzas (%).

3.5.4 Degradação da biomassa do estipe de *Bactris gasipaes* ao longo do tempo

A degradação da biomassa do estipe foi observada ao longo de 60 dias nas três (3) parcelas estudadas, para isto foi montado experimento utilizando discos do estipe da pupunheira. Aleatoriamente foram selecionados três (3) discos de cada palmeira, os quais foram dispostos sem contato com o solo (FIGURA 14).

FIGURA 14 - DISCOS DE *Bactris gasipaes* SELECIONADOS PARA OBSERVAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DA BIOMASSA AO LONGO DO TEMPO



FONTE: A autora (2020).

Os tratamentos: material sem degradação (T0), material exposto após 3 dias (T3), 6 dias (T6), 9 dias (T9), 16 dias (T16), 23 dias (T23), 30 dias (T30), 45 dias (T45) e 60 dias (T60) foram definidos para a realização do experimento. No tratamento T0 todos os discos foram pesados e três (3) foram retirados aleatoriamente, e assim sucessivamente nos tratamentos subsequentes. Em cada tratamento os discos retirados eram pesados e levados a estufa a 60 °C até massa constante. No material degradado foram realizadas análises de teor de umidade na base úmida, solubilidade em hidróxido de sódio (NaOH 1%), perda de massa, análise química imediata e poder calorífico.

A solubilidade em NaOH 1% foi realizada de acordo com a norma adaptada TAPPI T212 om-02 (TAPPI, 2002b), para a determinação do nível de degradação da biomassa. Em um Erlenmeyer de 125 mL foram adicionados 1,000 g de amostra e 50 mL de solução de NaOH 1%, agitando com bastão de vidro. A amostra foi colocada em banho-maria a aproximadamente 96 °C por 1 hora, sendo agitadas com bastão de vidro nos primeiros 10, 15 e 20 minutos. As amostras foram filtradas utilizando um cadinho de vidro sinterizado e lavada com 50 mL de água quente, e em seguida foram adicionados 25 mL de uma solução de ácido acético 10%. Após, a amostra foi lavada

com água destilada quente até ficar livre de ácido, e seca em estufa à 105 °C até massa constante.

3.5.5 Poder calorífico superior e inferior

O poder calorífico superior foi determinado de acordo com a norma ISO 18125:2017 da *International Organization for Standardization* (ISO, 2017) utilizando o equipamento IKA C5000. O valor da energia de vaporização da água (volume constante) a 25 °C é de 41,53 kJ mol⁻¹, correspondendo a 0,206 MJ kg⁻¹ para 1% (m/m) de hidrogênio na amostra ou 0,0231 MJ kg⁻¹ para 1% (m/m) de umidade na amostra.

O poder calorífico inferior e o poder calorífico inferior na umidade recebida foram calculados a partir da (EQUAÇÃO 14) e da (EQUAÇÃO 15), o teor de hidrogênio (H) utilizado nos cálculos foi considerado o valor de 6%, comumente utilizado para biomassas (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

$$PCI = PCS - 0,206H \quad (14)$$

$$PCI_{(UR)} = PCI \cdot \left(\frac{100 - TU_{bu}}{100} \right) - (0,0231 \cdot TU_{bu}) \quad (15)$$

Em que:

PCI = Poder calorífico inferior (MJ kg⁻¹);

PCS = Poder calorífico superior (MJ kg⁻¹);

H = Teor de hidrogênio (%);

$PCI_{(UR)}$ = Poder calorífico inferior na umidade recebida (MJ kg⁻¹);

TU_{bu} = Teor de umidade na base úmida (%).

A produtividade energética da biomassa do estipe, da folha e da bainha das pupunheiras analisadas, foi calculada de acordo com a EQUAÇÃO 16.

$$PE = Bsc_{ij} \cdot PCS \quad (16)$$

Em que:

PE = Produtividade energética (MJ ha^{-1});

B_{scj} = Biomassa seca do componente i da planta j (kg);

PCS = Poder calorífico superior (MJ kg^{-1})

3.5.6 Análise termogravimétrica (TG)

A análise termogravimétrica (TG) foi realizada no equipamento Netzsch STA 449 F3 (DQUI/UFPR). As análises foram realizadas em atmosferas oxidativa e inerte, utilizando como gases de arraste ar sintético e nitrogênio, respectivamente. O material foi aquecido de temperatura ambiente a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, em três diferentes taxas de aquecimento: 5, 10 e $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A temperatura de ignição foi determinada pelo método da interseção, onde dois pontos na curva TG são identificados (A e B). Uma linha vertical é traçada no pico da curva DTG (ponto mais alta da curva), a interseção com a curva TG é definido como ponto A. O ponto B é onde começa a desvolatilização (liberação de materiais voláteis), uma reta tangente ao ponto A na curva TG é traçada, a interseção com a linha horizontal que passa pelo ponto B é identificado como a temperatura de ignição (T_i) (LU; CHEN, 2015).

A temperatura de *burnout* (T_b) é identificada na temperatura em que a conversão térmica da biomassa atinge 99%, denominado método de conversão (EQUAÇÃO 17).

$$\text{Conversão \%} = \frac{m_i - m}{m_i - m_f} \cdot 100 \quad (17)$$

Em que:

m = massa instantânea da amostra (mg);

m_i = massa inicial (mg);

m_f = massa final (mg).

O índice de combustão e o índice de ignição foram calculados usando as (EQUAÇÕES 18 e 19), respectivamente (BURATTI *et al.*, 2015).

$$\text{Índice de combustão} = \frac{R_{max} \cdot R_a}{T_i^2 \cdot T_b} \quad (18)$$

$$\text{Índice de ignição} = \frac{R_{max}}{t_m \cdot t_i} \quad (19)$$

Em que:

R_{max} = taxa máxima de perda de massa;

R_a = taxa média de perda de massa;

T_i = Temperatura de ignição;

T_b = Temperatura de *burnout*;

t_m = tempo corresponde à taxa máxima;

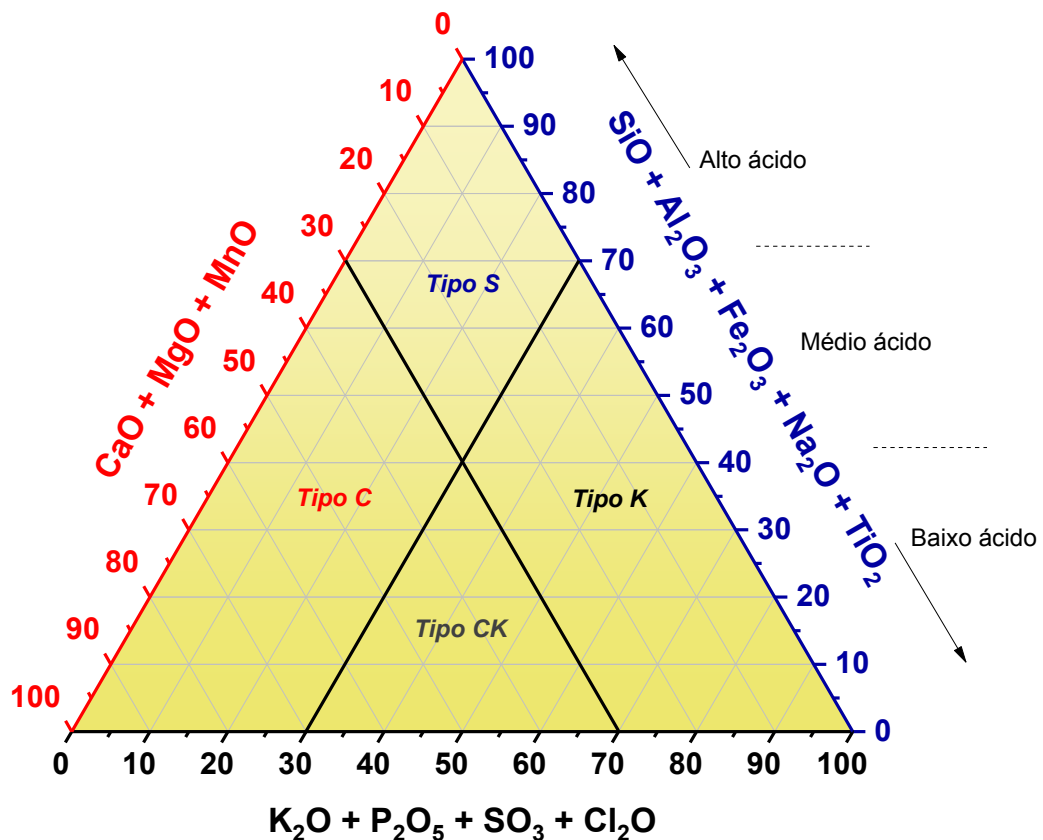
t_i = tempo de ignição que corresponde à temperatura inicial.

3.5.7 Composição e classificação química das cinzas

Os compostos inorgânicos presentes na biomassa foram caracterizados por Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (FRX) na forma de cinzas. Inicialmente, as amostras de biomassa foram submetidas ao processo de combustão em um forno mufla a 550 °C por 5 horas. Após essa etapa, as cinzas obtidas foram moídas e colocadas em estufa a 50 °C por 24 horas. As amostras foram analisadas no Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X Panalytical Axios Max (DGEOL/UFPR). Os resultados apresentados foram normalizados para 100%.

Os óxidos encontrados nas cinzas podem ser agrupados em função do óxido predominante presente nas cinzas (JENKINS *et al.*, 1998). Os óxidos mais abundantes nas cinzas de biomassa são Si, Al, Ca, Mg, K e P, os quais foram agrupados em três pares de óxidos mais abundantes: Si - Al (Tipo S) que incluem os óxidos de Fe, Na e Ti, Ca - Mg (Tipo C) que incluem os óxidos de Mn e K -P (Tipo K) que incluem os óxidos de S e Cl e a junção dos óxidos de Ca – K (Tipo CK,). O agrupamento se deu de acordo com as correlações positivas e negativas entre óxidos (VASSILEV; BAXTER; VASSILEVA, 2014). As áreas de predominância de cada óxido são observadas na FIGURA 15.

FIGURA 15 - ÁREAS DE PREDOMINÂNCIA DOS ÓXIDOS DO TIPO S, TIPO C, TIPO CK E TIPO K.



FONTE: a autora (2020)

3.6 DELINEAMENTO ESTATÍSTICO

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC) onde os tratamentos foram distribuídos em esquema fatorial 3^3 , sendo local (1, 2, e 3), classe de diâmetro (1, 2 e 3) e componente (estipe, bainha e folha). O experimento para analisar a degradação dos estipes da pupunheira foi um delineamento inteiramente casualizado, com nove tratamentos. Os tratamentos foram os períodos em que o material foi analisado, T0 (material sem degradação – testemunha), T3, T6, T9, T16, T23, T30, T45 e T60.

Os dados foram analisados com o auxílio do *software* R versão 3.6.0 (R Core Team, 2019) pacote “*ExpDes.pt*” (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2018), a partir da análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p < 0,05$) e quando as médias apresentaram diferenças significativas, aplicou-se o teste de Tukey ($p < 0,05$) para a comparação das médias.

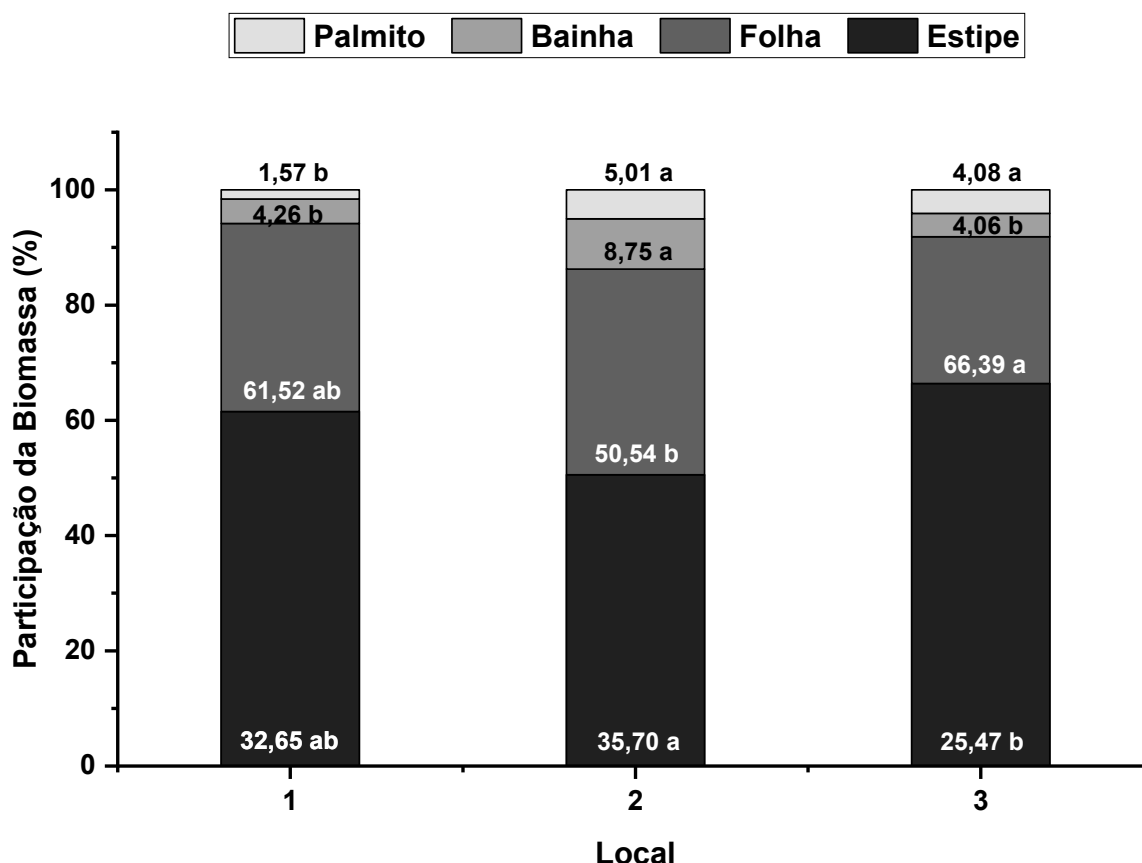
A normalidade dos resíduos foi realizada pelo teste de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$), e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene ($p \leq 0,05$), as variáveis que não atenderam um dos requisitos para realização da ANOVA, foram transformados para se adequarem à análise.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS E ESTIMATIVA DE BIOMASSA SECA

Ao realizar a colheita do palmito comestível é necessário cortar o perfilho da *B. gasipaes* todo, gerando grande quantidade de biomassa residual, pois o produto comercialmente utilizado, representa cerca de 2 a 5 % da planta (GRÁFICO 9), o restante é descartado. A participação da biomassa verde dos componentes da *B. gasipaes* pode ser observada no (GRÁFICO 9).

GRÁFICO 9 - PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA VERDE DOS COMPONENTES ESTIPE, BAINHA, FOLHAS E PALMITO EM *Bactris gasipaes*



FONTE: A autora, 2020

O local 3 apresentou a maior proporção de estipe em relação aos locais 1 e 2, pois neste local foram encontradas as pupunheiras com as maiores alturas, inversamente apresentou as menores proporções em folha e bainha. As pupunheiras

encontradas no local 2 apresentaram menores alturas e diâmetros, valores mais próximos ao ponto de corte do palmito, possivelmente eram perfilhos mais jovens, ressaltando que o ano de implantação do cultivo não corresponde à idade dos perfilhos e sim a idade das touceiras. O componente com a maior representatividade nas plantas de *B. gasipaes* foi o estipe, com mais de 50%.

Os valores médios para as variáveis mensuradas no inventário nos três locais são apresentados na TABELA 2.

TABELA 2 - MÉDIAS, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS MENSURADAS NOS LOCAIS 1, 2 E 3, VOLUME E DENSIDADE BÁSICA

Variável	Local	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação %
d₁₀ (cm)	1	13,23 A	1,38	10,44
	2	13,48 A	1,72	12,80
	3	13,13 A	1,40	10,68
d₃₀ (cm)	1	12,99 A	1,96	15,06
	2	12,46 A	1,66	13,33
	3	12,97 A	2,14	16,50
hl (m)*	1	3,00 AB	0,62	20,74
	2	2,34 B	0,35	14,95
	3	3,84 A	1,33	34,63
v (m³)	1	0,2409 A	0,1569	65,13
	2	0,1396 A	0,0707	50,63
	3	0,3743 A	0,2987	79,80
db (cm³ g⁻¹)	1	0,134 A	0,02	14,56
	2	0,140 A	0,01	7,76
	3	0,131 A	0,06	46,64

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: d₁₀: diâmetro à 10 cm de altura em relação ao solo; d₃₀: diâmetro à 30 cm em relação ao solo; hl: altura medida até a inserção da folha flecha; v: volume; db: densidade básica.

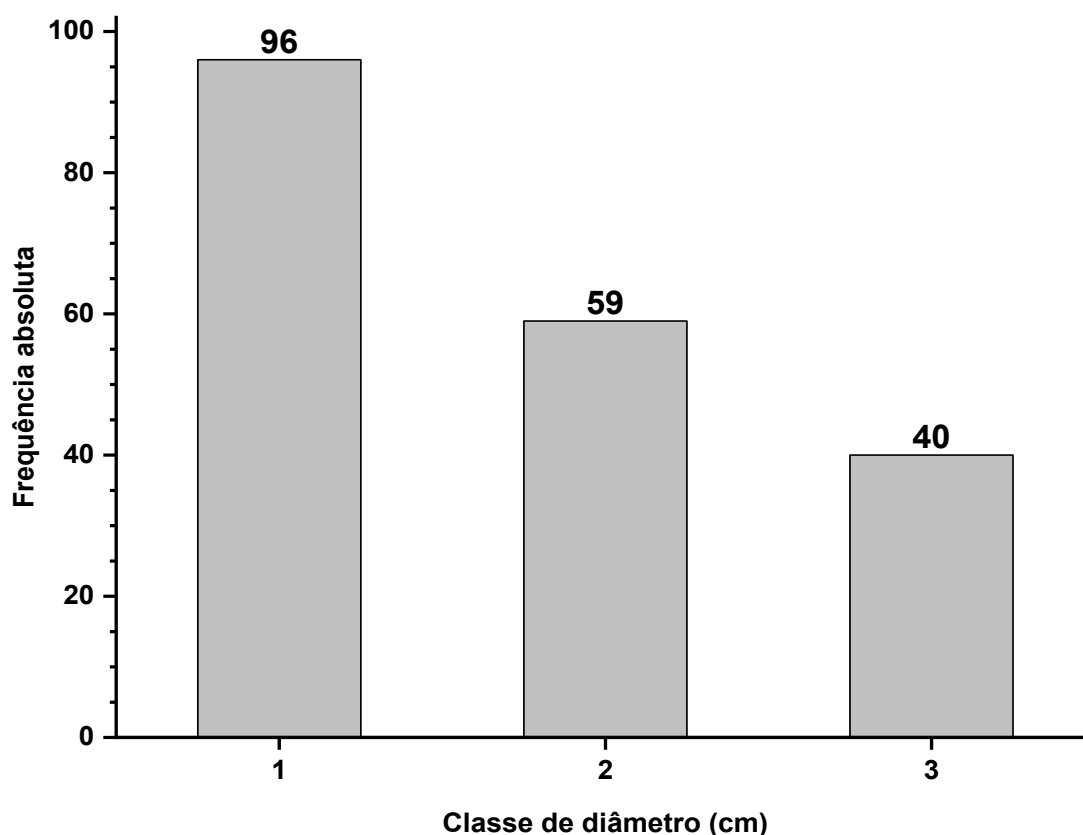
O estipe da pupunheira apresenta forma cônica em sua base e torna-se cilíndrico quanto mais aproxima-se do topo. As plantas com diâmetros menores, apresentaram valores inferiores para o diâmetro mensurado à 10 cm de altura do solo em relação aos diâmetros mensurados à 30 cm de altura do solo, enquanto as plantas com diâmetros maiores, apresentaram valores superiores ou iguais para ambos os diâmetros mensurados. Essa característica observada pode ser relacionada com o fato de as palmeiras não apresentarem crescimento secundário, ou seja, não tendo incremento no diâmetro.

Os diâmetros médios, para ambos os diâmetros mensurados, ficaram em torno de 12 e 13 cm, pois foram mensuradas as plantas dentro do limite mínimo de 10

cm e limite máximo de 16 cm. De acordo com Silva, [s.d.], Chaimsohn, (2001), Neves *et al.*, (2007), o ponto de corte de palmeiras de *B. gasipaes* para produção de palmito dependem de fatores como a região do plantio, características edafoclimáticas, manejo de perfilhos, e diâmetros que variam de 8 a 10 cm, a alturas que variam de 10 a 50 cm em relação ao solo. Durante a realização do inventário foi observado que as palmeiras com diâmetros maiores que 16 cm já haviam passado do tempo para a colheita do palmito, algumas inclusive, estavam frutificando, isto é decorrente da falta de manejo dos perfilhos e das touceiras. As palmeiras cultivadas no local 3 apresentaram as maiores alturas em relação aos demais locais (1 e 2), possivelmente devido ao sombreamento das plantas neste local, pois são plantas pioneiras, heliófilas de rápido crescimento. A idade dos perfilhos pode também estar relacionada com este fato, entretanto não é possível afirmar qual a idade exata deles, já que a idade dos perfilhos não é a mesma das touceiras. Os maiores volumes cubados foram encontrados nas plantas localizadas no local 3, pois neste local estavam as maiores plantas mensuradas.

A partir das informações obtidas no inventário, as palmeiras foram divididas em três (3) classes de diâmetro médio (média dos diâmetros obtidos à 10 e a 30 cm de altura do solo), sendo elas: classe 1 de 10 a 12cm; classe 2 de 12 a 14 cm e classe 3 de 14 a 16 cm. O histograma de distribuição das frequências diamétricas está representado no (GRÁFICO 10).

GRÁFICO 10 - DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA POR CLASSE DE DIÂMETRO PARA AS PLANTAS DE *Bactris gasipaes*



FONTE: A autora (2020).

A frequência de palmeiras na classe de diâmetro 1 é superior às classes 2 e 3, o que era esperado devido à finalidade do plantio ser a produção de palmito. Porém nos locais 1, 2 e 3 na estação experimental do IDR - Paraná, foram encontradas pupunheiras com diâmetros superiores ao recomendado para a produção e colheita do palmito. Em cultivos comerciais, onde há acompanhamento e manejo da cultura, possivelmente não se encontram plantas de *B. gasipaes* na classe 3 de diâmetro (14 a 16 cm) e raramente na classe 2 de diâmetro (12 a 14 cm).

Modelos alométricos foram ajustados para estimar a produção de biomassa seca para pupunheiras cultivadas na região de estudo. Por meio de análise de correlação pelo método de Pearson (TABELA 3), as variáveis altura até a inserção da folha flecha (h_l) e diâmetro a 30 cm de altura do solo (d_{30}) foram selecionadas para os ajustes dos modelos 1 ao 12 (equações de simples e dupla entrada), como variáveis independentes de fácil obtenção. No modelo 13 (equação de tripla entrada) além das variáveis supracitadas incluiu-se a densidade básica, já no modelo ajustado pelo método *Stepwise* foram utilizadas todas as variáveis apresentadas na (TABELA 3),

sendo que as variáveis independentes que melhor explicaram a variável dependente foram *hl*, *db* e *d*₁₀.

TABELA 3 - ANÁLISE DE CORRELAÇÃO (MÉTODO DE PEARSON) DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES COM A VARIÁVEL DEPENDENTE

Variáveis	Bst
<i>d</i> ₁₀	0,41* Sig 0,036
<i>d</i> ₃₀	0,59* Sig 0,001
<i>hl</i>	0,88* Sig 2,19.10 ⁻⁹
<i>db</i>	0,63* Sig 0,00

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: *d*₁₀: diâmetro a 10 cm de altura do solo; *d*₃₀: diâmetro a 30 cm de altura do solo; *hl*: altura até inserção da folha flecha; Bst: biomassa seca total.

NOTA: *A correlação é significativa ao nível de $p \leq 0,05$.

A correlação mais forte foi entre a biomassa seca e a altura da planta de *B. gasipaes*, pois o estipe tem a maior representatividade na palmeira, como é possível observar no (GRÁFICO 9).

Os valores dos coeficientes de determinação ajustado (R^2_{aj}), os erros padrão da estimativa em porcentagem (S_{xy} %), significância dos coeficientes de regressão (β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 e β_5) pelo teste *t* e o teste do qui-quadrado, para os modelos ajustados são apresentados na (TABELA 4).

TABELA 4 - COEFICIENTES E ESTATÍSTICA DE PRECISÃO DOS MODELOS TESTADOS E AJUSTADOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA SECA DAS PUPUNHEIRAS NA REGIÃO DE MORRETES – PR

N°	Parâmetros						Ajuste		Validação	
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R^2_{aj}	$S_{xy} \%$	$S_{xy} \%$	χ^2_{cal}
1	-5,51*	4,67*					0,76	31,29	32,62	10,6
2	-2,06 ^{ns}	2,53 ^{ns}	0,30 ^{ns}				0,75	31,63	32,61	11,0
3	2,14*	0,64*					0,76	39,07	31,43	11,0
4	-7,03*	14,80*					0,71	34,47	34,98	10,2
5	0,22*	1,67*					0,75	31,54	35,25	10,8
6	3,75*	-4,87*					0,74	32,68	37,26	10,9
7	-2,96*	1,29*	1,41*				0,75	31,96	36,42	10,9
8	2,68*	0,04*					0,77	30,54	33,36	11,4
9	0,87 ^{ns}	-9,39 ^{ns}	2,68 ^{ns}	0,55 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,78	29,91	30,68	6,1
10	-4,77 ^{ns}	1,28 ^{ns}	0,05*	-0,05 ^{ns}			0,79	29,02	32,17	9,6
11	2,55*	0,12 ^{ns}	0,04 ^{ns}				0,76	31,12	31,24	10,8
12	-5,88 ^{ns}	1,06 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,08 ^{ns}		0,79	29,41	30,38	6,0
13	-1,04 ^{ns}	1,41*	1,07*	0,86*			0,88	27,51	38,66	11,1
14	-20,06*	3,68*	52,88*	0,77*			0,88	22,37	33,73	12,6

FONTE: A autora (2020).

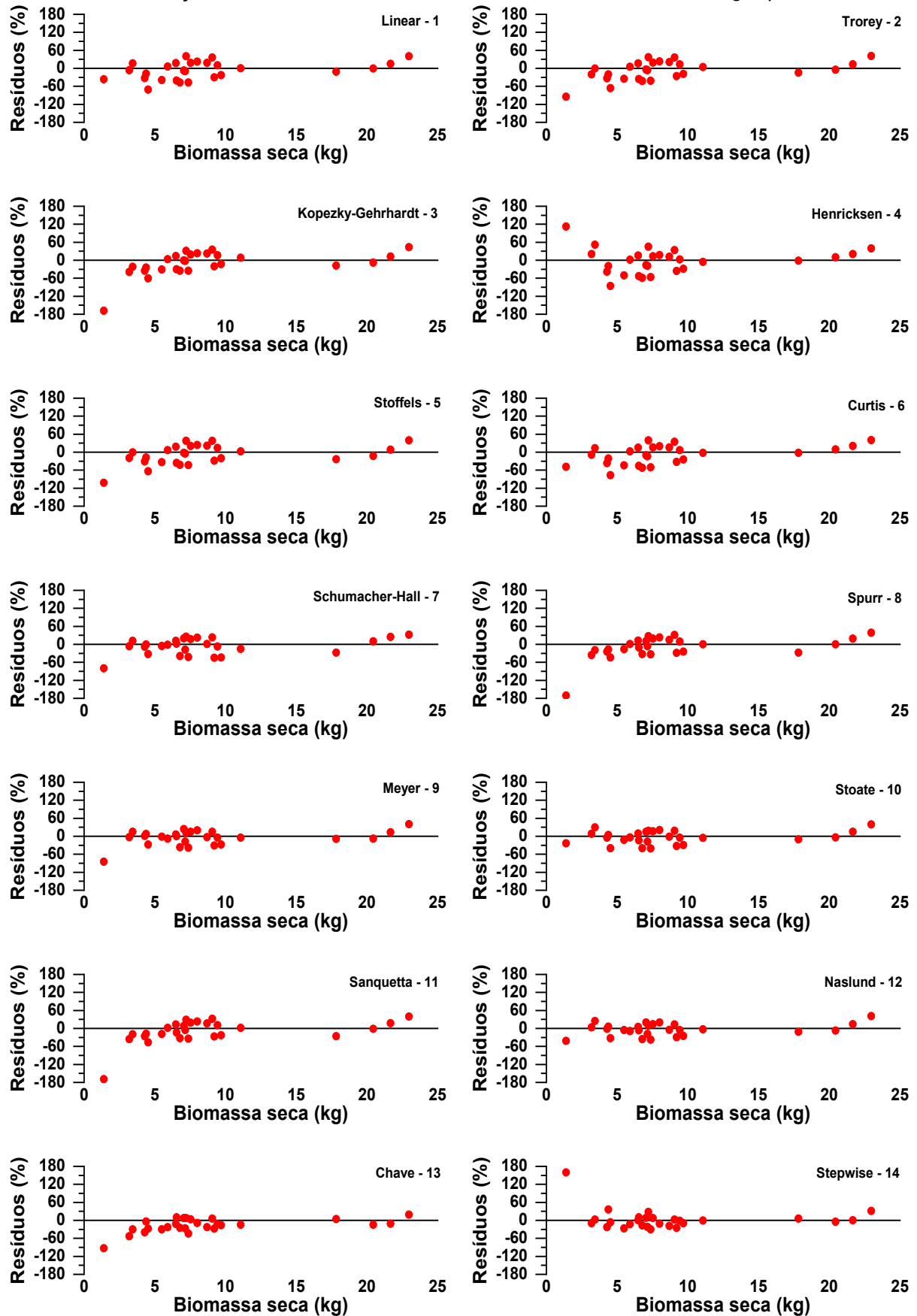
Os modelos 13 e 14 (tripla entrada) apresentaram os melhores valores para os parâmetros de ajuste analisados, porém o modelo ajustado pelo método *Stepwise* foi o que atendeu a todos os critérios de seleção. A inclusão da densidade básica (db) como variável independente no ajuste, indica tendência de minimização dos erros das estimativas, devido a sua determinação ser mais precisa (CHAVE *et al.*, 2005).

No teste do qui-quadrado (χ^2) os valores calculados foram inferiores aos valores tabelados ao nível de 95% de probabilidade, portanto todos os modelos validados podem ser usados para estimativa de biomassa seca total. Analisando o R^2_{aj} , $S_{xy} \%$ e a significância dos coeficientes da regressão, o modelo mais apropriado é o 14.

O Modelo 1 ajustado pelo método *Stepwise* foi o que apresentou melhor desempenho para estimativa de biomassa seca nas palmeiras de *Bactris gasipaes* cultivadas na área de estudo, pois considera a entrada e saída simultânea de variáveis da equação. O ajuste de modelos matemáticos utilizando dados de palmeiras de cultivos para palmito são incomuns, os modelos utilizados neste trabalho são comumente aplicados na área florestal. O conjunto de dados obtidos ainda é exploratório neste tipo de análise, neste sentido o modelo ajustado pelo método *Stepwise* foi a melhor opção para aplicação.

A análise gráfica dos resíduos em função da biomassa seca total dos modelos 1 ao 14 é apresentada na (FIGURA 16).

FIGURA 16 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DE BIOMASSA SECA TOTAL EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA TOTAL DE PLANTAS DE *Bactris gasipaes*



FONTE: A autora (2020).

Observa-se uma dispersão mais homocedástica dos resíduos no modelo 14, modelo que apresentou os melhores indicadores estatísticos, porém nota-se uma tendência similar de distribuição dos resíduos ao longo da linha de regressão, para todos os modelos ajustados.

Utilizando o modelo ajustado pelo método *Stepwise*, foram estimadas as quantidades de biomassa seca por hectare para os locais 1, 2 e 3 que são apresentadas na (TABELA 5).

TABELA 5 - ESTIMATIVA DE BIOMASSA SECA DE *Bactris gasipaes* PARA AS PARCELAS 1, 2 E 3 E O TOTAL PARA A ÁREA DE ESTUDO

Local	Biomassa seca (ton ha ⁻¹)
1	31,82
2	24,97
3	46,25

FONTE: A autora (2020).

As plantas de *B. gasipaes* com as maiores alturas médias e com as maiores proporções de estipe foram encontradas no local 3, o que ocasionou a maior quantidade de biomassa seca produzida. No local 2, ao contrário do que se observou para o local 3, as plantas de *B. gasipaes* apresentaram as menores alturas médias e menores proporções de estipe e folhas, produzindo menor quantidade de biomassa seca.

4.2 ANÁLISES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E ENERGÉTICAS

Atendendo os critérios de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (teste de Levene) ambos a 5% de significância as variáveis umidade, material volátil, carbono fixo, cinza, extrativos, lignina, holocelulose, poder calorífico superior, poder calorífico inferior e poder calorífico inferior na umidade recebida, foram submetidas à análise de variância, e posteriormente ao teste de comparação de médias.

4.2.1 Teor de umidade da biomassa de *Bactris gasipaes*

O teor de umidade é uma propriedade importante quando se estuda biomassa para energia, principalmente no processo de combustão. A análise de variância para

o teor de umidade dos componentes estipe, bainha e folha na base úmida, apresentou diferenças significativas na interação dos fatores local, classe de diâmetro e componente (APÊNDICE - A), sendo assim o teste de Tukey foi aplicado (TABELA 6).

TABELA 6 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA (%)

Componente	Classe de diâmetro	Local		
		1	2	3
Estipe	1	83,75 ± 0,84 bC	85,90 ± 1,56 abC	88,95 ± 1,20 aC
	2	84,92 ± 1,74 aC	84,10 ± 1,58 aC	81,32 ± 4,72 aC
	3	82,89 ± 3,00bC	83,83 ± 1,13 abC	87,01 ± 0,91 aC
Bainha	1	52,66 ± 2,30 aB	51,45 ± 1,48 aB	53,14 ± 6,65 aB
	2	48,86 ± 3,31 bB	53,45 ± 4,77 aB	54,15 ± 1,89 aB
	3	49,24 ± 1,74bB	51,35 ± 2,88 bB	55,45 ± 2,61 aB
Folha	1	36,01 ± 5,11 bA	40,00 ± 3,14 aA	38,36 ± 3,94 abA
	2	34,35 ± 5,64 bA	43,15 ± 2,98 aA	42,31 ± 2,92 aA
	3	35,01 ± 2,50 bA	40,61 ± 2,14 aA	42,56 ± 4,45 aA

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância; Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

O estipe foi o componente que apresentou as maiores médias para teor de umidade, valores acima de 80%. Há uma relação direta entre o teor de umidade e a tecnologia de conversão em energia, pois na conversão térmica exige-se baixo teor de umidade da matéria-prima (em geral < 50%). Algumas tecnologias até permitem o uso de biomassa com alto teor de umidade, porém o balanço geral de energia para o processo de conversão é prejudicado. (MCKENDRY, 2002).

Os componentes bainha e folha apresentaram percentuais para o teor de umidade inferiores ao estipe, destacando a folha com percentuais médios em torno de 40%. No local 1 o componente folha apresentou os menores valores médios, abaixo de 40%, o que torna a folha o componente mais indicado para uso direto no processo de combustão.

LOH (2017) em estudo realizado na Malásia utilizando biomassa de *Elaeis guineensis* (Jacq.) (dendzeiro) como fonte renovável de energia, encontrou teores de umidade para folha de 46,3%, valores superiores ao encontrado para a folha de *B. gasipaes*. Para o estipe de *E. guineensis* o teor de umidade foi de 75,6%, valores inferiores ao encontrado para *B. gasipaes*.

As condições climáticas (umidade relativa do ar e temperatura) no momento do corte das palmeiras podem ter influenciado nos altos teores de umidade no estipe. Na data da coleta dos materiais nos locais 1, 2 e 3 os valores médios para umidade relativa do ar e temperatura eram respectivamente de 99,5% e 15,5 °C, 90,5% e 17,9 °C, e 99,0% e 16,9 °C, dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019). Segundo (Mckendry, 2002), duas formas de teor de umidade são de interesse na biomassa, umidade intrínseca (sem a influência dos efeitos climáticos), e extrínseca (as condições climáticas, principalmente durante a colheita influenciam na biomassa).

Alternativas como realizar a colheita em épocas com umidade relativa baixa, a secagem da biomassa utilizando estufa solar, tendo em vista que é uma tecnologia eficiente, de baixo custo e sustentável, podem ser eficazes e tornar a biomassa do estipe da pupunheira mais adequada para uso direto na obtenção de energia. Altos teores de umidade podem ser de interesse em outros processos de conversão, por exemplo a conversão bioquímica. Biomassas com altos teores de umidade, baixo teor de lignina e alta concentração de carboidratos são mais adequadas para utilização como substrato no processo de digestão anaeróbia para produção de biogás (gás metano) (MCKENDRY, 2002).

4.2.2 Análise imediata e composição estrutural da biomassa de *Bactris gasipaes*

A análise de variância para as variáveis material volátil, carbono fixo e cinza apresentou diferenças ao nível de significância (APÊNDICE - B). O teor de material volátil dos componentes estipe, bainha e folha teve efeito da interação dos fatores local, classe de diâmetro e componente, o teste de Tukey para comparação das médias é apresentado na (TABELA 7).

TABELA 7 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL MATERIAL VOLÁTIL

Componente	Classe de diâmetro	Local		
		1	2	3
Estipe	1	72,92 ± 0,98 bcB	72,33 ± 1,75 bA	71,15 ± 1,57 cB
	2	73,20 ± 2,84 abB	73,37 ± 1,58 abB	75,17 ± 2,64 aA
	3	75,38 ± 3,18 aA	73,34 ± 1,12 abA	71,62 ± 0,71 bcB
Bainha	1	74,28 ± 1,02 aA	73,38 ± 1,27 abcA	71,71 ± 0,60 cB
	2	74,72 ± 0,55 aA	73,14 ± 1,11 abA	73,75 ± 0,86 abA
	3	73,68 ± 0,70 aAB	72,29 ± 2,23 abA	72,90 ± 0,92 abcAB
Folha	1	72,17 ± 0,84 bA	72,16 ± 0,82 bA	73,20 ± 0,47 bA
	2	71,21 ± 0,76 cA	72,21 ± 0,68 bcA	73,75 ± 1,05abA
	3	71,92 ± 0,58 bcA	72,09 ± 1,09 abcA	72,62 ± 0,56 abcA

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

O material volátil representa o vapor condensável e gases permanentes (exceto o vapor da água) liberados da biomassa quando ela é aquecida (CAI *et al.*, 2017). Consiste principalmente em hidrocarbonetos, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio. Em processos termoquímicos, altos teores de material volátil tornam a amostra de biomassa altamente reativas (REZA *et al.*, 2019).

O valor médio para teor de material volátil foi acima de 70%, sendo a bainha do local 1 o componente com os maiores valores médios e a folha do local 1 foi o componente que apresentou os menores valores. Lu & Chen (2015) encontraram teores de material volátil para bambu de 67,02% e para o bagaço de cana de 73,70%. Loh (2017) encontrou valores médios de 73,76% para folha e 86,70% para o estipe de *E. guineensis*.

O conhecimento do conteúdo de material volátil, simula o aspecto prático da combustão da biomassa na caldeira. Um teor mais alto indica que a biomassa pode ser facilmente inflamada e subsequentemente gaseificada ou oxidada. Os dados podem ser usados para estabelecer as características de queima da biomassa. (LOH, 2017).

A variável carbono fixo teve efeito da interação dos fatores local, classe de diâmetro e componente, o teste de Tukey para comparação das médias é apresentado na (TABELA 8).

TABELA 8 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL CARBONO FIXO

Componente	Classe de diâmetro	Local		
		1	2	3
Estipe	1	22,94 ± 0,44 aAB	22,97 ± 1,16 aA	22,88 ± 1,29 aA
	2	22,67 ± 1,54aAB	23,18 ± 1,74 aA	22,10 ± 1,38 aA
	3	22,00 ± 2,15 bB	22,77 ± 0,63 bA	25,34 ± 0,29 aA
Bainha	1	22,27 ± 0,14 bB	23,19 ± 0,94 abA	24,17 ± 1,01 aA
	2	22,30 ± 0,30 aB	23,27 ± 0,49 aA	23,19 ± 0,82 aA
	3	23,02 ± 0,69 aAB	23,59 ± 1,49 aA	24,35 ± 0,55 aA
Folha	1	24,22 ± 0,47 aA	23,78 ± 0,45 aA	23,40 ± 0,54 aA
	2	24,29 ± 0,69 aA	23,87 ± 0,49 aA	22,95 ± 1,23 aA
	3	23,78 ± 0,71 aA	23,14 ± 0,59 aA	23,96 ± 0,24 aA

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

A folha foi o componente que apresentou a maior média para carbono fixo, comportamento inverso apresentado para o teor de material volátil. Lu & Chen (2015) encontraram valores para carbono fixo de 25,45% e 12,09% para bambu e bagaço de cana, respectivamente. Os componentes da *B. gasipaes* apresentaram valores superiores os encontrado para o bagaço de cana, o que é um bom resultado para uso energético. Materiais com altos teores de carbono fixo tendem a queimar mais lentamente e requerem maior tempo de residência para a queima total, quando comparados com materiais com baixo conteúdo de carbono fixo (BRAND, 2010). No processo de combustão, a folha pode ser utilizada para manter o processo por mais tempo, ou seja, para alimentar o fogo.

A interação dos fatores local, classe de diâmetro e componente teve efeito na variável cinza, o teste de Tukey foi aplicado para comparação das médias (TABELA 9).

TABELA 9 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL CINZA (%)

Componente	Classe de diâmetro	Local		
		1	2	3
Estipe	1	4,14 ± 0,65 bA	4,69 ± 0,91 bA	5,97 ± 0,71 aA
	2	4,13 ± 1,33 aA	3,45 ± 0,28 abB	2,73 ± 1,28 bC
	3	2,63 ± 1,05 aB	3,88 ± 0,51 aB	3,04 ± 0,56 aC
Bainha	1	3,46 ± 1,00 aA	3,43 ± 0,54 aB	4,11 ± 1,16 aB
	2	2,98 ± 0,33 aB	3,60 ± 1,01 aB	3,06 ± 0,13 aC
	3	3,30 ± 0,52 abAB	4,12 ± 0,98 aAB	2,75 ± 0,41 bC
Folha	1	3,61 ± 0,52 aA	4,06 ± 0,40 aAB	3,40 ± 0,44 aC
	2	4,49 ± 0,81 aA	3,92 ± 0,44 abAB	3,31 ± 0,25 bC
	3	4,30 ± 0,15 abA	4,77 ± 0,85 aA	3,42 ± 0,46 bC

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância; Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

A presença e a quantidade de material inorgânico na biomassa está relacionado com a concentração de nutrientes (macro e micro) que são de fundamental importância para o crescimento e o desenvolvimento das plantas. A maior ou menor concentração destes elementos nos componentes da planta é influenciado por diversos fatores como espécie, condições do sítio, idade, época do ano e práticas de manejo.

As plantas de *B. gasipaes* analisadas apresentaram médias entre 2,6 e 5,9% em todos os componentes, o maior valor médio observado foi no estipe do local 3 na classe de diâmetro 1 (5,97%). Os valores encontrados para os componentes da *B. gasipaes* foram inferiores ao encontrado para o bagaço da cana de açúcar (11,35%), encontrado por Lu & Chen (2015) e para a folha de *E. guineensis* (15,46%) (LOH, 2017).

A análise de variância das variáveis extrativo total, lignina total e holocelulose mostrou diferenças significativas para os fatores estudados (APÊNDICE - C).

A variável extrativo total apresentou influência da interação dos fatores local, classe de diâmetro e componente. O teste Tukey foi aplicado para comparação das médias (TABELA 10).

TABELA 10 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL EXTRATIVO TOTAL (%)

Componente	Classe de diâmetro	Local		
		1	2	3
Estipe	1	39,33 ± 0,19 aA	37,54 ± 0,01bA	35,62 ± 0,48 cA
	2	41,49 ± 0,74 aA	38,37 ± 0,50 bA	38,38 ± 0,69 bA
	3	39,52 ± 0,34 bA	36,32 ± 0,55 cA	43,95 ± 0,32 aA
Bainha	1	31,38 ± 0,73 aB	30,79 ± 0,60 aB	24,16 ± 0,12 bB
	2	27,12 ± 0,40 cB	29,92 ± 0,44 aB	28,83 ± 0,06 bB
	3	27,13 ± 0,27 bB	30,90 ± 0,71 aB	25,67 ± 0,14 cB
Folha	1	19,22 ± 0,60 cC	28,01 ± 0,10aC	22,41 ± 0,43 bC
	2	21,07 ± 0,08 cC	27,25 ± 0,39 aC	24,10 ± 0,41 bC
	3	20,66 ± 0,30 cC	28,79 ± 0,34 aC	27,47 ± 0,17 bC

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância; Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

O estipe apresentou alto valor médio para teor de extrativos (43,95%), possivelmente carboidratos de baixo peso molecular (açúcares), presentes na biomassa foram solubilizados nas diferentes etapas de extração, contribuindo assim para o alto valor obtido. Lopes *et al.*, (1998) encontraram valores de extrativo total entre 15% (região externa ao córtex) e 33% (região do córtex) em estipe de *Bactris gasipaes*, em plantas com diâmetros variando de 25 a 30 cm.

As palmeiras analisadas pelos autores supracitados, apresentavam diâmetros maiores que as palmeiras analisadas no presente estudo, indicando que as plantas eram mais velhas, porém ao comparar o valor obtido na região do córtex no estipe destas plantas com o valor encontrado neste estudo, as médias são próximas. Segundo Magellan; Tomlinson; Huggett, (2015), em estipes jovens de espécies do gênero *Bactris*, as fibras vasculares são largas e longas, porém a parede celular torna-se progressivamente mais espessa, lamelada e lignificada, já as fibras não vasculares são curtas, estreitas e não lignificadas.

O teor de holocelulose teve efeito com a interação dos fatores local, classe de diâmetro e componente, para comparação das médias foi aplicado o teste de Tukey (TABELA 11)

TABELA 11 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL HOLOCELULOSE (%)

Componente	Classe de diâmetro	Local		
		1	2	3
Estipe	1	50,59 ± 1,08 bC	56,98 ± 0,38 aB	55,68 ± 0,30 aC
	2	48,94 ± 0,11cD	53,19 ± 2,21 aD	51,03 ± 0,81 bD
	3	47,84 ± 0,31 cD	53,06 ± 0,62 aD	51,05 ± 0,03 bD
Bainha	1	56,58 ± 0,93 cB	59,29 ± 0,25 bA	64,17 ± 1,34 aA
	2	59,81 ± 0,58 aA	56,00 ± 0,02 bB	55,28 ± 0,28 bC
	3	60,65 ± 0,54 aA	55,43 ± 0,58 bB	62,17 ± 0,21 aA
Folha	1	59,79 ± 1,22 aA	54,60 ± 0,45 bC	60,01 ± 0,45 aB
	2	58,84 ± 0,33 aA	53,05 ± 0,50 bD	59,98 ± 0,08 aB
	3	57,32 ± 0,71 aB	48,19 ± 0,86 cE	54,45 ± 0,22 bC

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância; Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

A bainha do local 3 foi o componente que apresentou as maiores médias para o percentual de holocelulose, sendo nas classes de diâmetro 1 e 2 apresentados os maiores valores médios. O teor de holocelulose médio encontrado para o fuste de clones de *Eucalyptus* foi acima de 70% (OLIVEIRA, 2019), valores superiores ao observado para os componentes de *B. gasipaes*.

Segundo Rowell - Editor, (2005), o teor de holocelulose compõe em cerca de 65 a 70% da massa seca de madeira, e é composto por celulose (40 - 45%) e hemicelulose (15 - 25%). Esse polímero é rico em grupos hidroxila que são responsáveis pela sorção de umidade por meio das ligações de hidrogênio. O teor de holocelulose observado para as amostras de biomassa analisadas neste trabalho, foi acima de 50% entre as classes de diâmetro e entre os componentes, um percentual menor do que o indicado para madeira.

O menor valor médio encontrado para teor de holocelulose neste trabalho corrobora para a presença significativa de açúcares (monômeros) na composição da biomassa, contribuindo para um aumento no valor médio do teor de extrativos. O menor valor médio observado para o componente estipe apoia esse comportamento apresentado.

O teor de lignina total teve efeito com a interação dos fatores local, classe de diâmetro e componente, para comparação das médias foi aplicado o teste de Tukey (TABELA 12)

TABELA 12 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL LIGNINA TOTAL (%)

Componente	Classe de diâmetro	Local		
		1	2	3
Estipe	1	10,08 ± 0,89 aC	5,48 ± 0,37 aG	8,71 ± 0,18 bE
	2	9,58 ± 0,63 abC	8,44 ± 1,71 bF	10,59 ± 0,12aD
	3	12,64 ± 0,03 aB	10,61 ± 0,08 bE	4,99 ± 0,35 cF
Bainha	1	12,05 ± 0,20 aB	9,92 ± 0,35 aF	11,67 ± 0,1,22 bC
	2	13,07 ± 0,98 bB	14,08 ± 0,46 bD	15,89 ± 0,34 aB
	3	12,22 ± 0,27 aB	13,67 ± 0,13 aD	12,15 ± 0,07 aC
Folha	1	20,98 ± 0,61 aA	17,39 ± 0,35 b C	17,58 ± 0,87 bA
	2	20,09 ± 0,41 aA	19,69 ± 0,88 aAB	15,93 ± 0,50 bB
	3	22,01 ± 0,40 aA	23,03 ± 0,52 aA	18,07 ± 0,39 bA

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância; Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Inversamente ao observado para o teor de extrativo total, o componente estipe apresentou o menor valor médio para teor de lignina (4,99%), o que não é um resultado desejado para uso da biomassa em processos de conversão térmica. Conforme Liu; Jiang; Yu, (2015) a macromolécula de lignina possui cerca de 40% da energia possível da biomassa, devido ao seu alto teor de carbono.

Lopes *et al.* (1998) também observaram baixos valores médios para o teor de lignina da parte interna do estipe de *B. gasipaes* (2%), já na parte externa do estipe foram observados valores de até 35%. Neste trabalho a maior média encontrada foi para o componente folha com 23,03% de lignina.

Analisando os resultados apresentados, a biomassa do estipe das pupunheiras utilizadas neste estudo, não seria desejável como combustível para obtenção de energia por meio do processo de combustão. Porém, o componente estipe apresentou características interessantes para potencial uso como substrato no processo de digestão anaeróbia: altos teores de umidade, possivelmente altas concentrações de açúcares menores (monômeros) e baixo teor de lignina. Entretanto o componente folha apresentou os melhores resultados para liberação de energia através do processo de combustão.

4.2.3 Poder calorífico e produtividade energética da biomassa de *Bactris gasipaes*

As variáveis poder calorífico superior, inferior e inferior na umidade recebida apresentaram diferenças significativas na interação dos fatores local, classe de diâmetro e componente (APÊNDICE - D). O teste Tukey para comparação das médias da variável poder calorífico superior são apresentadas na (TABELA 13).

TABELA 13 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL PODER CALORÍFICO SUPERIOR (%)

Componente	Classe de diâmetro	Local		
		1	2	3
Estipe	1	17,44 ± 0,33 aB	17,11 ± 0,34 bC	17,05 ± 0,20 bC
	2	16,99 ± 0,18 bC	17,21 ± 0,21 bC	17,62 ± 0,39 aB
	3	17,79 ± 0,17 aB	17,32 ± 0,14 abBC	17,53 ± 0,26 bB
Bainha	1	17,55 ± 0,28 aB	17,60 ± 0,22 aB	17,67 ± 0,15 aB
	2	17,80 ± 0,11 aB	17,60 ± 0,13 aB	17,86 ± 0,12 aB
	3	17,77 ± 0,27 aB	17,59 ± 0,15 aB	17,79 ± 0,19 aB
Folha	1	18,68 ± 0,08 aA	18,74 ± 0,21 aA	18,49 ± 0,07 aA
	2	18,44 ± 0,18 aA	18,64 ± 0,42 aA	18,59 ± 0,30 aA
	3	18,43 ± 0,19 aA	18,67 ± 0,32 aA	18,74 ± 0,35 aA

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância; Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

O poder calorífico superior representa o calor liberado pelo processo de combustão, em que toda a água resultante é condensada na forma líquida. O poder calorífico inferior apresenta valores menores, devido ao calor latente para evaporação da água (EBERHARD, 1990). O poder calorífico inferior na umidade recebida considera o teor de umidade do combustível, apresenta os menores valores, pois a maior parte da energia liberada é utilizada para evaporar a água contida no material.

Os maiores valores foram observados no componente folha, acima de 18 MJ kg⁻¹, o qual não teve influência do local e da classe de diâmetro. O estipe apresentou os menores valores para poder calorífico superior. As médias encontradas para os componentes da *B. gasipaes* foram superiores ao encontrado para o bagaço de cana (15,79 MJ kg⁻¹) (LU & CHEN, 2015) e para a folha de *E. guineensis* (15,72

MJ kg⁻¹) e ficaram próximos ao observado para o estipe de *E. guineensis* (17,47 MJ kg⁻¹) (LOH, 2017).

O teste Tukey para comparação das médias da variável poder calorífico inferior são apresentadas na (TABELA 14).

TABELA 14 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL PODER CALORÍFICO INFERIOR (%)

Componente	Classe de diâmetro	Local		
		1	2	3
Estipe	1	16,20 ± 0,33 aBC	15,87 ± 0,34 bC	15,81 ± 0,20 bC
	2	15,75 ± 0,18 bC	15,98 ± 0,21 bC	16,39 ± 0,39 aBC
	3	16,56 ± 0,17 aBC	16,08 ± 0,14 bBC	16,30 ± 0,26 abBC
Bainha	1	16,32 ± 0,28 aB	16,36 ± 0,22 aB	16,43 ± 0,15 aB
	2	16,56 ± 0,11 aB	16,36 ± 0,13 aB	16,63 ± 0,12 aB
	3	16,53 ± 0,27 aB	16,35 ± 0,15 aB	16,55 ± 0,19 aB
Folha	1	17,44 ± 0,08 aA	17,50 ± 0,21 aA	17,26 ± 0,07 aA
	2	17,20 ± 0,18 aA	17,40 ± 0,42 aA	17,36 ± 0,30 aA
	3	17,19 ± 0,19 aA	17,44 ± 0,32 aA	17,50 ± 0,35 aA

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância; Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Os resultados observados para PCS e PCI foram proporcionais ao teor de lignina, o componente folha apresentou as maiores médias para teor de lignina e consequentemente as maiores médias para poder calorífico superior e inferior. Inferindo que o poder calorífico superior teve influência do teor de lignina, o que foi corroborado pela análise de regressão (R^2_{aj} 0,73; S_{xy} % 1,70). Segundo (Demirbas, 2017) o valor calórico da lignina está entre 22,2 e 28,5 MJ kg⁻¹, o que pode ser explicado pelo alto teor de carbono e pelas diferenças na composição química dessa macromolécula em distintas biomassas.

O teste Tukey para comparação das médias da variável poder calorífico inferior na umidade recebida são apresentadas na (TABELA 15).

TABELA 15 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DA VARIÁVEL PODER CALORÍFICO INFERIOR NA UMIDADE RECEBIDA (%)

Componente	Classe de diâmetro	Local		
		1	2	3
Estipe	1	0,68 ± 0,23 aC	0,27 ± 0,35 abC	-0,29 ± 0,27 bC
	2	0,53 ± 0,21 aC	0,59 ± 0,30 aC	1,12 ± 0,88 aC
	3	0,97 ± 0,60 aC	0,66 ± 0,24 abC	0,09 ± 0,14 bC
Bainha	1	6,38 ± 0,36 aB	6,68 ± 0,20 aB	6,89 ± 1,16 aB
	2	7,45 ± 0,70 aB	6,48 ± 0,29 bB	6,59 ± 0,19 bB
	3	7,33 ± 0,18 aB	6,88 ± 0,69 aB	5,86 ± 0,26 bB
Folha	1	10,18 ± 0,79 aA	9,86 ± 0,47 aA	9,60 ± 0,73 aA
	2	10,68 ± 1,06 aA	8,83 ± 0,57 bA	8,84 ± 0,29 bA
	3	10,40 ± 0,35 aA	9,26 ± 0,32 bA	9,11 ± 0,79 bA

FONTE: A autora (2020).

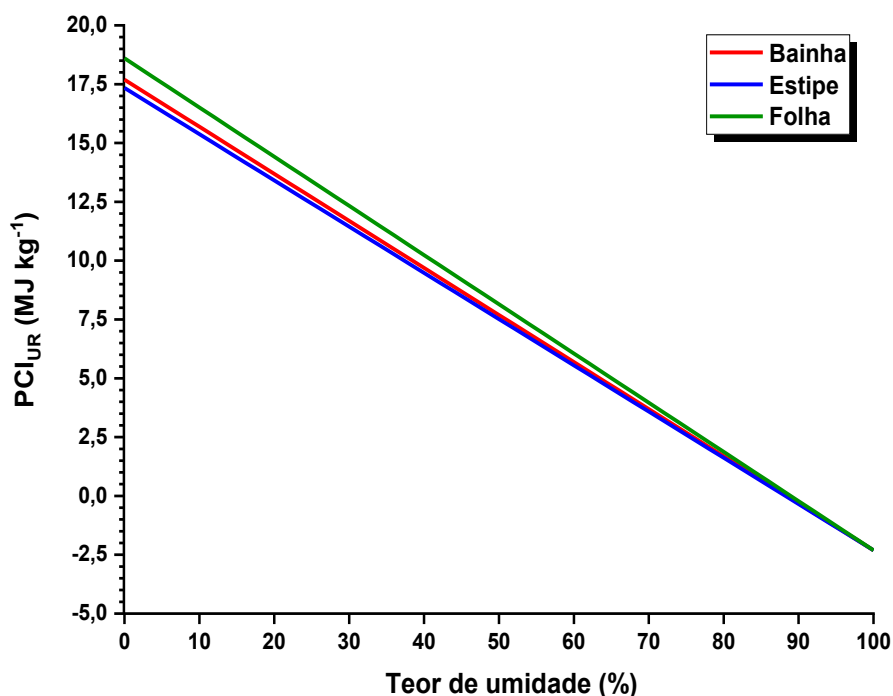
LEGENDA: Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância; Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

No local 1 a classe de diâmetro não teve efeito sobre a variável poder calorífico inferior na umidade recebida. Assim como foi observado para PCS e PCI, a folha apresentou os maiores valores médios e o estipe os menores valores médios para PCI_{UR} entre os componentes. Este resultado já era esperado, pois o estipe possui altos teores de umidade e menores médias para PCS, inclusive no local 3 foi possível observar valores negativos para esta variável.

Valores baixos para PCI_{UR} não são desejáveis, pois a quantidade de calor liberada é pequena e o balanço de energia fica prejudicado, tornando-se imprescindível a realização de pré-secagem da biomassa de *B. gasipaes* para seu uso como fonte primária de energia.

O (GRÁFICO 11) demonstra a redução no poder calorífico de acordo com o aumento da umidade na biomassa de *Bactris gasipaes*.

GRÁFICO 11 - COMPORTAMENTO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR MÉDIO DA BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* EM RELAÇÃO AO TEOR DE UMIDADE BASE ÚMIDA



FONTE: A autora (2020).

O poder calorífico inferior da biomassa da *B. gasipaes* foi influenciado negativamente pelo teor de umidade, foi possível observar que em 60% de umidade o PCI_{UR} está próximo de 5 MJ kg^{-1} , baixa quantidade de energia liberada pelo material.

O alto teor de umidade pode afetar a conversão geral de energia porque influencia o poder calorífico de um determinado material. Um combustível úmido requer energia extra para aquecer e evaporar a água presente antes da ocorrência da combustão. Quanto maior o teor de umidade, menos energia por kg é liberada durante a combustão (menor poder calorífico) (LOH, 2017; SUKIRAN *et al.*, 2017).

A análise de variância para produtividade energética apresentou diferenças significativas para a interação dos fatores local e classe de diâmetro e para o efeito simples do fator componente (APÊNDICE – A). O teste Tukey foi aplicado para comparação das médias (TABELA 16 e TABELA 17)

TABELA 16 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NA INTERAÇÃO DOS FATORES LOCAL E CLASSE DE DIÂMETRO PARA A VARIÁVEL PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA (MJ ha⁻¹)

Classe de diâmetro	Local		
	1	2	3
1	3.451 ± 3293 aB	2.211 ± 1617 aA	2.507 ± 2809 aB
2	4.157 ± 3299 bB	4.404 ± 3917 bA	9.860 ± 8820 aA
3	8.790 ± 7479 aA	5.009 ± 2811 aA	7.407 ± 5962 aA

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância; Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

As classes de diâmetros 2 e 3 apresentaram as maiores médias para produtividade energética, resultado já esperado, visto que as pupunheiras com maiores diâmetros produziram maiores quantidades de biomassa. Sendo as pupunheiras com diâmetros acima de 12 cm as mais indicadas para uso energético, pois produzem mais energia por hectare.

TABELA 17 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS NO FATOR COMPONENTE PARA A VARIÁVEL PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA (MJ ha⁻¹)

Componente	Média
Estipe	5.584 ± 6070 B
Bainha	1.135 ± 531 C
Folha	9.212 ± 4351 A

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras maiúsculas iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Entre os componentes, a folha apresentou as maiores quantidades de biomassa seca e as maiores médias de poder calorífico superior, consequentemente observou-se a maior produtividade energética para este componente. A bainha foi o componente com a menor média em produtividade energética, porém não menos importante, pois este material (bainha) é resíduo na indústria de beneficiamento do palmito. Após a colheita, o palmito é levado à indústria envolto com as bainhas (entre duas a três) com o objetivo de proteger o produto, onde é separado das bainhas que são descartadas e que atualmente não tem destinação comercial.

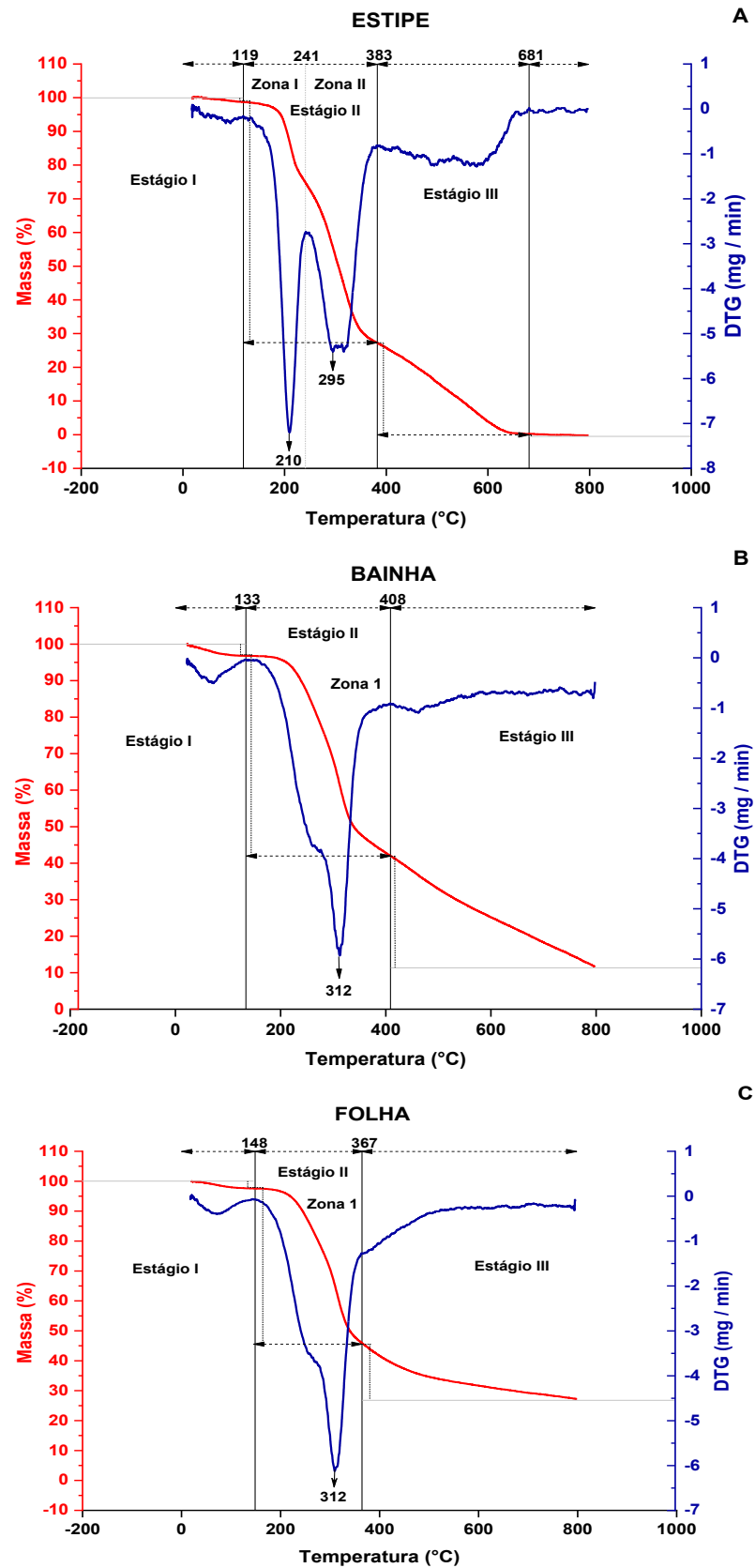
4.2.4 Análise termogravimétrica (TG) e comportamento térmico da biomassa de *Bactris gasipaes*

Diferentes biomassas têm diferentes desempenhos nos processos de conversão energética, por isso é importante seu conhecimento. A análise termogravimétrica é a técnica em monitorar o comportamento da massa de uma amostra sólida em função da temperatura ou do tempo. A amostra é submetida a um programa de temperatura específico em atmosfera controlada (inerte, oxidativa), esta análise tem sido usada para investigar a cinética de degradação de diferentes materiais como polímeros (TANNOUS - Editor, 2015).

A análise termogravimétrica realizada em atmosfera inerte (nitrogênio), simula o processo de pirólise e apresenta o comportamento de uma biomassa durante sua carbonização. Em atmosfera de nitrogênio os estágios da degradação térmica são: I – desidratação, II – rápida desvolatilização e III – carbonização

No primeiro estágio houve uma pequena perda de massa (entre 0,04% e 3,20%) para os três componentes, que corresponde a evaporação da umidade. No estágio II pode-se observar uma perda de massa mais acentuada, onde a biomassa foi degradada e convertida em material volátil, a maior contribuição neste estágio é pela desvolatilização da holocelulose. No estágio III a perda de massa é principalmente atribuída à degradação térmica da lignina, onde o carvão é o principal produto (GRÁFICO 12).

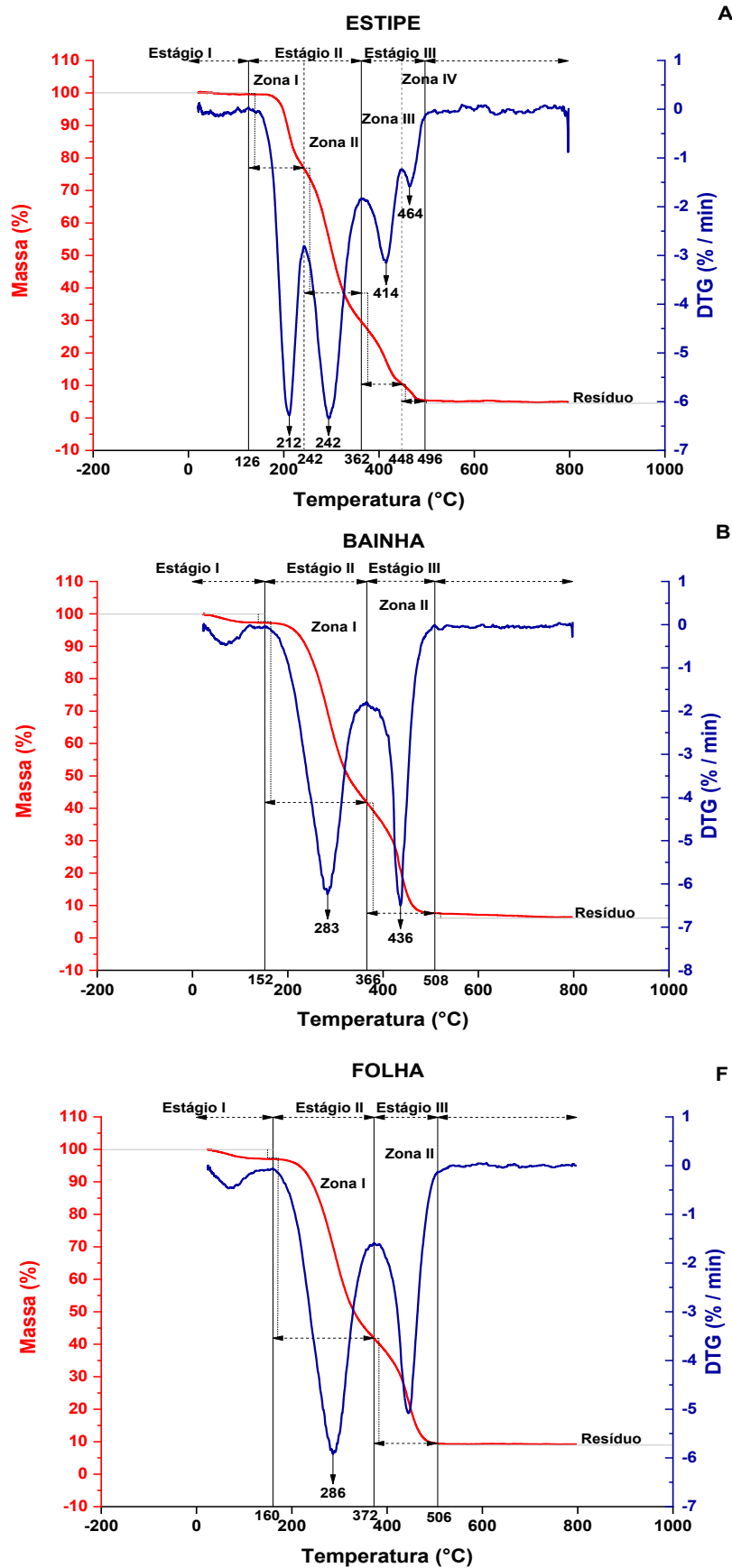
GRÁFICO 12 - CURVAS TG E DTG DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO COMPONENTE ESTIPE (A), BAINHA (B) E FOLHA (3) DA BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* SOB ATMOSFERA DE NITROGÊNIO NA TAXA DE AQUECIMENTO DE $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$.



FONTE: a autora (2020).

A análise termogravimétrica em atmosfera de ar sintético simula o processo de combustão completa, onde os estágios de degradação térmica são: I – desidratação, II – rápida desvolatilização oxidativa e III – combustão, neste estágio o carvão formado no estágio II é degradado utilizando o oxigênio da atmosfera carreadora e convertido em CO_2 e H_2O (GRÁFICO 13).

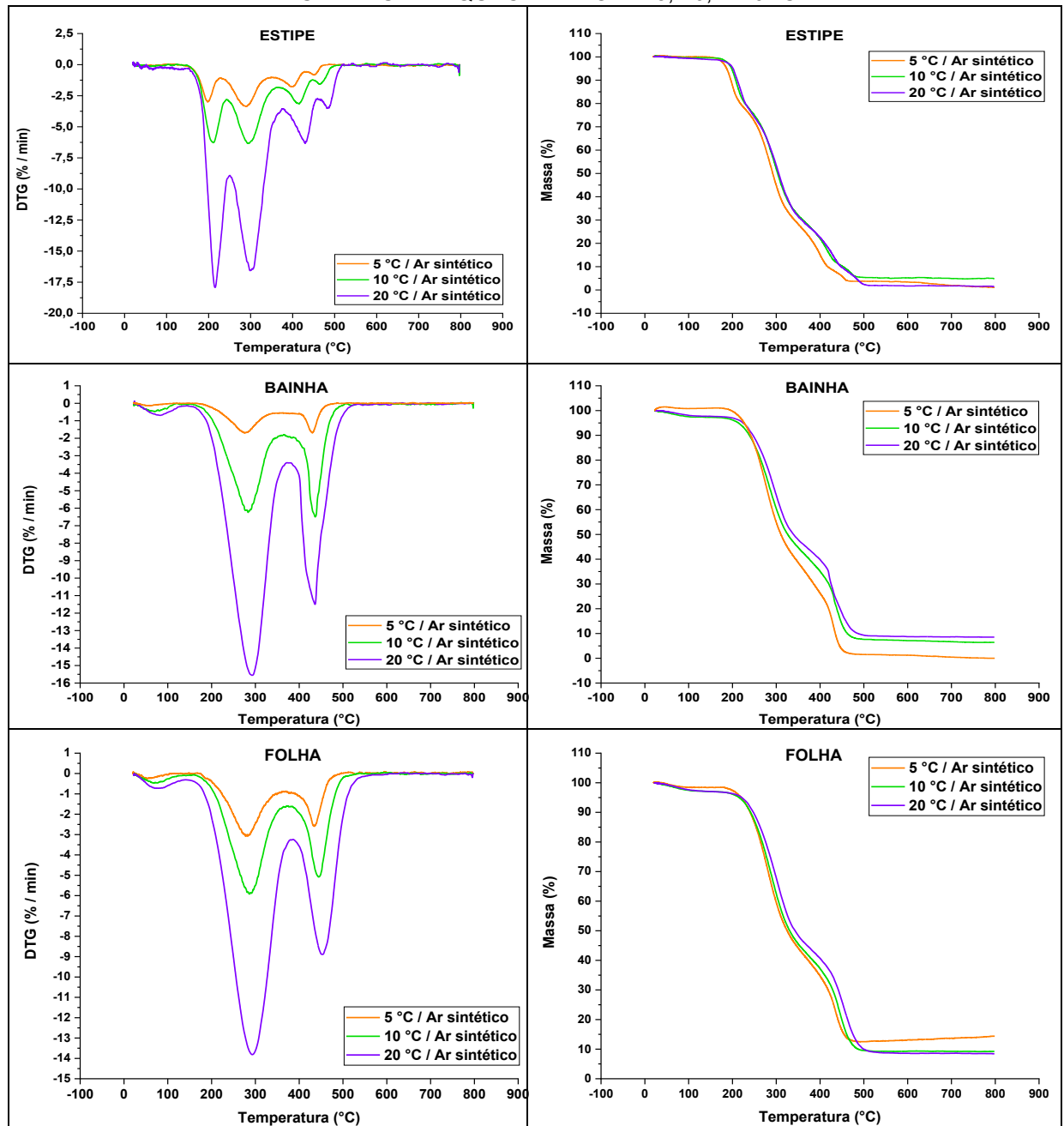
GRÁFICO 13 - CURVAS TG E DTG DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO COMPONENTE ESTIPE (A), BAINHA (B) E FOLHA (C) DA BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* SOB ATMOSFERA DE AR SINTÉTICO NA TAXA DE AQUECIMENTO DE 10 °C min⁻¹.



FONTE: a autora (2020).

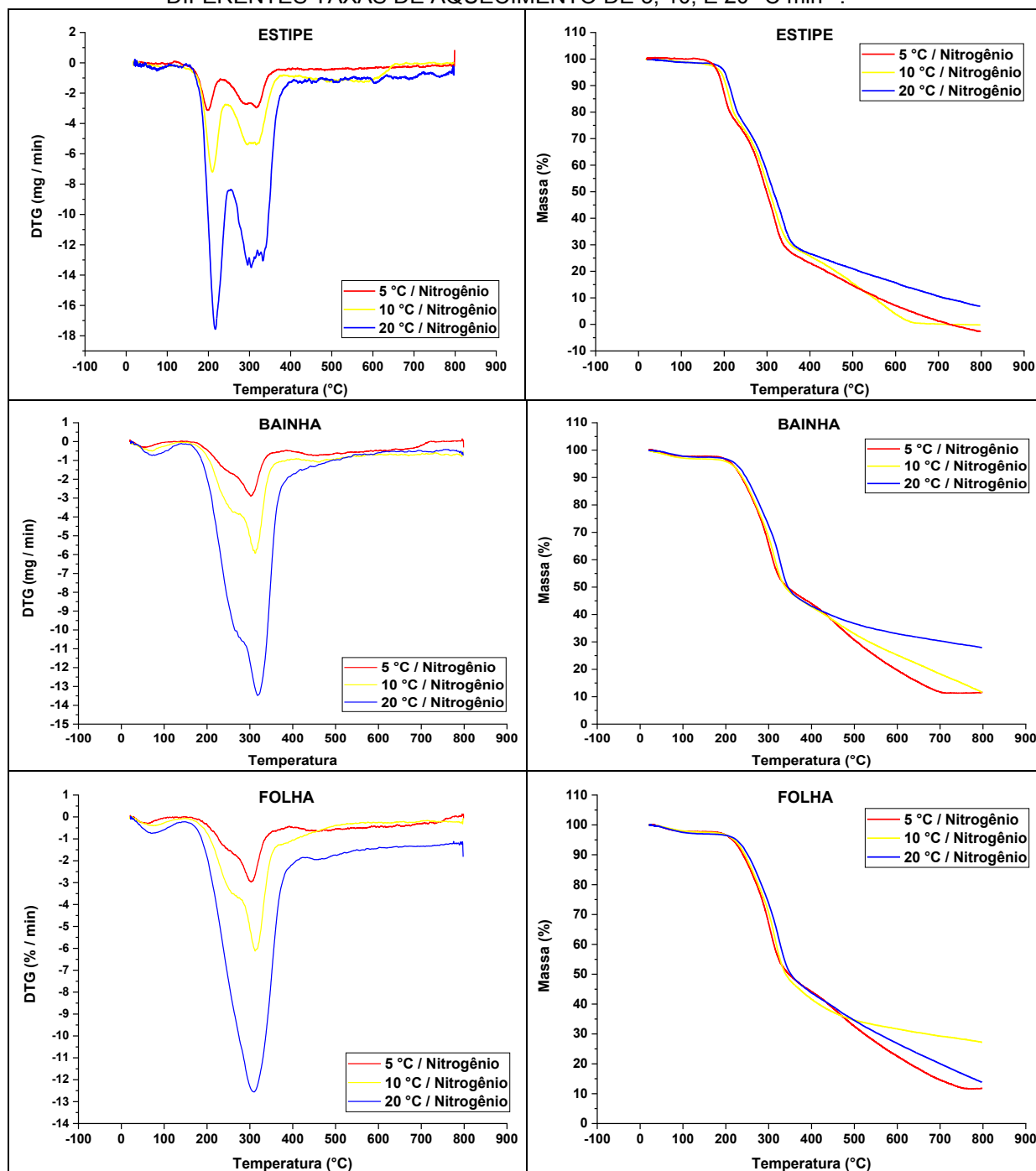
Sob atmosfera de nitrogênio o estipe apresentou dois picos de perda de massa no estágio II sendo definidos como zona 1 e zona 2 (GRÁFICO 12 (A)), sob atmosfera de ar sintético apresentou dois picos nos estágios II (zona 1 e zona 2) e dois picos no estágio III (zona 3 e zona 4) (GRÁFICO 13 (A)). Tendência observada nas diferentes taxas de aquecimento (GRÁFICOS 14 e 15) a bainha e a folha apresentaram um pico de perda de massa no estágio II sob atmosfera de nitrogênio, e dois picos no estágio II (zona 1 e zona 2) sob atmosfera de ar sintético.

GRÁFICO 14 - CURVAS TG E DTG DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* SOB ATMOSFERA DE AR SINTÉTICO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO DE 5, 10, E 20 °C min⁻¹.



FONTE: A autora (2020).

GRÁFICO 15 - CURVAS TG E DTG DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* SOB ATMOSFERA DE NITROGÊNIO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO DE 5, 10, E 20 °C min⁻¹.



FONTE: A autora (2020).

A degradação térmica da lignina apresenta, na curva DTG, um pico mais amplo em comparação com a celulose e a hemicelulose, devido à clivagem sucessiva das ligações conforme o aumento da temperatura da reação. Os componentes macromoleculares de cadeia longa (celulose, hemicelulose e lignina) são degradados em componentes com menor massa molecular, com uma taxa de aquecimento rápida

e curto tempo de residência o bio-óleo é o produto mais abundante da pirólise. Já com uma taxa de aquecimento lenta e longo tempo de residência, o principal produto da pirólise é o carvão. No processo de combustão, a pirólise é transformada em uma subetapa (pirólise oxidativa) para produzir o carvão e liberação dos gases. Ao reagirem com o oxigênio da atmosfera de ar sintético, tem-se uma reação de redução, sendo o principal produto o biogás. A diferença do comportamento na cinética e na degradação térmica entre as atmosferas de nitrogênio (inerte) e ar sintético (ativo), é essencial para o entendimento da conversão termoquímica eficiente da biomassa (MA *et al.*, 2018).

As faixas de temperatura onde ocorrem os três (3) estágios de degradação térmica e as respectivas perdas de massa nas taxas de aquecimento de 5, 10 e 20 °C são apresentadas na (TABELA 18), para as análises realizadas sob atmosfera de nitrogênio e (TABELA 19) para as análises realizadas sob atmosfera de ar sintético. No estágio I, como já mencionado, ocorre a liberação de água do material, para a realização desta análise as amostras foram secas, portanto a perda de massa no estágio I não será considerada.

TABELA 18 - CARACTERÍSTICAS DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DOS COMPONENTES ESTIPE, BAINHA E FOLHA DE *Bactris gasipaes* SOB ATMOSFERA DE NITROGÊNIO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO 5, 10 E 20 °C min⁻¹.

Amostra	Faixa de temperatura nos estágios (°C)			Perda de massa nos estágios (%)	
	I	II	III	II	III
Estipe 5°C min ⁻¹	20-117	117-368	368-800	74,16	25,76
Estipe 10°C min ⁻¹	20-119	119-383	383-800	71,43	27,26
Estipe 20°C min ⁻¹	20-146	146-408	408-800	72,22	19,41
Bainha 5°C min ⁻¹	20-140	140-386	386-800	52,40	33,74
Bainha 10°C min ⁻¹	20-134	134-409	409-800	54,82	30,32
Bainha 20°C min ⁻¹	20-136	136-386	386-800	53,04	16,45
Folha 5°C min ⁻¹	20-146	146-391	391-800	52,80	33,13
Folha 10°C min ⁻¹	20-148	148-367	367-800	51,98	18,33
Folha 20°C min ⁻¹	20-148	148-429	429-800	55,90	27,27

FONTE: A autora (2020).

O estipe apresentou aumento na faixa de temperatura nos três estágios com o incremento da taxa de aquecimento, sob a atmosfera de nitrogênio. A maior perda de massa para este componente ocorreu no estágio II. Para os componentes bainha e folha não foi observada a tendência no aumento da faixa de temperatura, a maior perda de massa também se deu no estágio II, porém em menores proporções do que o estipe.

No estágio II ocorre a liberação dos voláteis e a degradação das holoceluloses, o estipe foi o componente que apresentou o maior teor de extrativos (38,95%) e o menor teor de lignina (9,01%), o que pode explicar a maior porcentagem de perda de massa desse componente. Pode-se inferir que o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, produzido a partir do estipe será menor em relação aos outros componentes.

TABELA 19 - CARACTERÍSTICAS DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DOS COMPONENTES ESTIPE, BAINHA E FOLHA DE *Bactris gasipaes* SOB ATMOSFERA DE AR SINTÉTICO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO 5, 10 E 20 °C min⁻¹.

Amostra	Faixa de temperatura nos estágios (°C)			Perda de massa nos estágios (%)	
	I	II	III	II	III
Estipe 5°C min ⁻¹	20-119	119-349	349-478	71,43	24,89
Estipe 10°C min ⁻¹	20-126	126-363	363-497	69,96	24,20
Estipe 20°C min ⁻¹	20-113	113-375	375-522	72,12	25,19
Bainha 5°C min ⁻¹	20-147	147-351	351-522	62,47	36,97
Bainha 10°C min ⁻¹	20-152	152-366	366-509	55,46	34,19
Bainha 20°C min ⁻¹	20-142	142-373	373-526	53,39	35,27
Folha 5°C min ⁻¹	20-168	168-370	370-497	57,85	28,08
Folha 10°C min ⁻¹	20-160	160-372	372-506	55,21	32,32
Folha 20°C min ⁻¹	20-141	141-388	388-535	54,57	33,71

FONTE: A autora (2020).

Para as amostras analisadas sob a atmosfera de ar sintético, foi observada os maiores valores de perda de massa no estágio II, onde ocorre a degradação dos materiais voláteis, sendo o estipe o componente que apresentou a maior porcentagem, assim como sob a atmosfera inerte. No estágio III ocorre a degradação do carbono fixo onde foi observado comportamento inverso ao ocorrido no estágio II.

O padrão de arranjo das moléculas em cadeia na estrutura da celulose pode ser classificado em duas regiões: cristalina e amorfa. O arranjo é uniforme e ordenado na região cristalina que tem melhor estabilidade térmica do que a região amorfa (POLLETO; JÚNIOR; ZATTERA, 2014). As ligações de hidrogênio intramoleculares podem estabilizar as moléculas de celulose e inibir a expansão térmica ao longo da cadeia, melhorando a estabilidade térmica da fibra lignocelulósica. No processo de pirólise a região amorfa é degradada primeiro, a região cristalina absorve calor o suficiente para quebrar as ligações de hidrogênio antes da decomposição de sua estrutura (LIN *et al.*, 2017).

As curvas DTG e TG nas diferentes taxas de aquecimento tiveram o mesmo comportamento para ambas as atmosferas. As taxas de perda de massa aumentaram

conforme as taxas de aquecimento. Os picos de perda de massa aconteceram em temperaturas próximas (TABELAS 20 e 21) entre as taxas de aquecimento, a taxa de perda de massa aumenta de acordo com o aumento da taxa de aquecimento para todos os componentes. Este comportamento pode ter relação com os diferentes tempos de reação, ou seja, quanto menores as taxas de aquecimento maior o tempo de reação. O calor mínimo necessário para o craqueamento das partículas é alcançado posteriormente em temperaturas mais altas, uma vez que a transferência de calor não é tão efetiva e eficiente quando as taxas de aquecimento são menores (MANI *et al.*, 2010).

TABELA 20 - TEMPERATURA E TAXA DE PERDA DE MASSA NOS PICOS NA CURVA DTG DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* SOB ATMOSFERA DE NITROGÊNIO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO 5, 10 E 20 °C min⁻¹

Amostra	Evento térmico (°C)		Taxa de perda de massa (%)	
	Z1	Z2	Z1	Z2
Estipe 5°C min ⁻¹	199	368	3,13	0,43
Estipe 10°C min ⁻¹	210	295	7,20	5,41
Estipe 20°C min ⁻¹	217	304	17,57	13,50
Bainha 5°C min ⁻¹	303	-	2,90	-
Bainha 10°C min ⁻¹	313	-	5,93	-
Bainha 20°C min ⁻¹	318	-	13,48	-
Folha 5°C min ⁻¹	302	-	2,97	-
Folha 10°C min ⁻¹	312	-	6,12	-
Folha 20°C min ⁻¹	391	-	12,56	-

FONTE: A autora (2020).

A temperatura no evento térmico corresponde à taxa máxima de perda de massa, devido à volatilização e formação de material carbonáceo e é uma medida de combustibilidade, e sua taxa correspondente é uma medida de reatividade. As temperaturas nos eventos térmicos podem ser obtidas em diferentes estágios de degradação da biomassa, quando ocorrem à temperaturas mais baixas significa que o combustível é mais fácil de inflamar. Na TABELA 21, pode-se observar que as temperaturas nos eventos térmicos ocorridos em todas as zonas aumentam com o incremento na taxa de aquecimento.

TABELA 21 - TEMPERATURA E TAXA DE PERDA DE MASSA NOS PICOS NA CURVA DTG DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* SOB ATMOSFERA DE AR SINTÉTICO EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO 5, 10 E 20 °C min⁻¹

Amostra	Evento térmico (°C)				Taxa de perda de massa (%)			
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z1	Z2	Z3	Z4
Estipe 5°C min ⁻¹	198	290	400	450	2,99	3,36	1,77	0,84
Estipe 10°C min ⁻¹	212	295	414	464	6,28	6,35	3,15	1,58
Estipe 20°C min ⁻¹	215	299	430	482	17,93	16,57	6,34	3,52
Bainha 5°C min ⁻¹	277	429	-	-	0,70	0,62	-	-
Bainha 10°C min ⁻¹	283	436	-	-	6,24	6,50	-	-
Bainha 20°C min ⁻¹	292	436	-	-	15,56	11,50	-	-
Folha 5°C min ⁻¹	282	435	-	-	3,08	2,59	-	-
Folha 10°C min ⁻¹	286	445	-	-	5,92	5,08	-	-
Folha 20°C min ⁻¹	293	452	-	-	13,81	8,88	-	-

FONTE: A autora (2020).

O estipe apresentou as menores temperaturas e a folha os maiores valores, ou seja, o estipe é um material mais inflamável do que os outros dois componentes e degrada-se mais rapidamente. O estipe apresentou dois eventos térmicos a mais que a bainha e a folha, isto ocorreu possivelmente por ser um material mais instável termicamente, já a folha foi o componente que apresentou maior estabilidade térmica, se mostrando um material mais indicado para uso na obtenção direta de energia.

As temperaturas que ocorrem nos eventos térmico, temperatura de ignição e temperatura de *burnout* (combustão completa), são parâmetros importantes para análise do desempenho da combustão. A temperatura de ignição é definida como a temperatura na qual ocorre repentino decréscimo na perda de massa na curva DTG, e determina a facilidade de ignição de um combustível (IDRIS; RAHMAN; ISMAIL, 2012).

No método da interseção a temperatura de ignição é obtida com base na reação de degradação da celulose (LU; CHEN, 2015). O aumento da temperatura no evento térmico na zona I (TABELA 21) com o incremento da taxa de aquecimento, acarreta o acréscimo da temperatura de ignição, com exceção do estipe à 10 °C min⁻¹ (TABELA 22). A temperatura de ignição da biomassa está relacionada com a segurança no armazenamento e distribuição quando é utilizada como combustível na indústria (LU; CHEN, 2015).

TABELA 22 - TEMPERATURAS DE IGNIÇÃO E *BURNOUT* DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* EM DIFERENTES TAXAS DE AQUECIMENTO 5, 10 E 20 °C min⁻¹

Componente	Taxa de aquecimento (°C min ⁻¹)	T _i (°C)	T _b (°C)	Índice de ignição	Índice de combustão
Estipe	5	217,0	399,6	0,02	16,26
Estipe	10	224,0	421,7	0,09	12,85
Estipe	20	218,6	428,1	0,29	13,70
Bainha	5	232,2	427,6	0,03	22,06
Bainha	10	236,0	446,9	0,12	13,11
Bainha	20	244,3	458,5	0,36	8,30
Folha	5	234,8	453,9	0,03	26,95
Folha	10	237,8	460,1	0,12	17,38
Folha	20	243,1	474,4	0,37	12,85

FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: T_i Temperatura de ignição; T_b Temperatura de *burnout*.

A temperatura de *burnout* é conhecida como o tempo de queima, o intervalo de tempo em que o combustível (seco) começa a perder massa até a sua estabilização (final da combustão), na curva TG é a temperatura em que não há mais perda de massa durante o processo de combustão. Baixos valores para temperatura de *burnout* indicam a presença reduzida de material não queimado, enquanto altos valores indicam o grau de dificuldade de um combustível para queimar, havendo a necessidade de maiores temperaturas e maior tempo de residência para a conversão completa. A folha possui os maiores valores para temperatura de *burnout*, indicando que este componente tem mais dificuldade para queimar do que o estipe e a bainha.

As temperaturas de ignição e *burnout* dos componentes da biomassa de pupunheira aumentam com o aumento da taxa de aquecimento. Observa-se que a reatividade dos combustíveis se deve à combustão dos voláteis, no entanto a liberação de energia está relacionada principalmente com combustão do carbono fixo.

Segundo (LU; CHEN, 2015), que estudaram métodos e taxas de aquecimento diferentes para a determinação das temperaturas de ignição e *burnout* para bagaço da cana-de-açúcar e bambu, afirmam que esses parâmetros são adequados para determinação das temperaturas e suas aplicações na indústria, sendo propriedades de grande importância.

Baixo índice de ignição significa que o material combustível é inflamado mais rapidamente, o que ocorreu na menor taxa de aquecimento para todos os componentes. O índice de combustão apresentou comportamento inverso ao índice

de ignição, ou seja, o menor valor do índice de combustão se deu na maior taxa de aquecimento, inferindo que o material combustível queima mais rapidamente.

A queima de um combustível é um indicador do seu grau de reação, quanto maior a queima, menor o número de componentes combustíveis restantes no combustível. O conhecimento da temperatura de *burnout* da biomassa é capaz de fornecer uma visão útil da operação de sua combustão. Além disso, as temperaturas de ignição e de *burnout* são parâmetros-chave para avaliar a seleção, o consumo e o *design* (forma) do combustível (LU; CHEN, 2015).

4.2.5 Caracterização das cinzas da biomassa de *Bactris gasipaes* por FRX

O uso da biomassa e do seu material inorgânico (cinza) implicam em dois aspectos fundamentais a serem considerados: (1) aprimorar e ampliar os conhecimentos básicos referentes à sua composição e propriedades; e (2) aplicar esse conhecimento para uso inovador e sustentável (VASSILEV; BAXTER; VASSILEVA, 2013).

A cinza na biomassa pode ter origem primária no processo natural, antes e durante o crescimento da planta e após a sua morte. Origem secundária no processo tecnológico, durante a combustão, novas fases são geradas por reações sólidas, líquidas e gasosas entre os compostos pré existentes e recém formados. E origem terciária no processo natural durante o transporte e armazenamento de resíduos da combustão, onde novos minerais ou fases são originados por intemperismo (VASSILEV; BAXTER; VASSILEVA, 2013).

A biomassa da pupunheira segundo a classificação geral de diversas biomassas como recurso para uso de combustível sólido de acordo com sua diversidade biológica, fonte e origem é biomassa herbácea e agrícola – fibras (coco, linho, juta, kenaf, palmeira, outras) (VASSILEV *et al.*, 2012).

A TABELA 23 apresenta os óxidos determinados por espectroscopia de fluorescência de raios X nos componentes da biomassa de *Bactris gasipaes*. O principal óxido encontrado nos três componentes foi o K₂O, sendo o estipe com as maiores porcentagens.

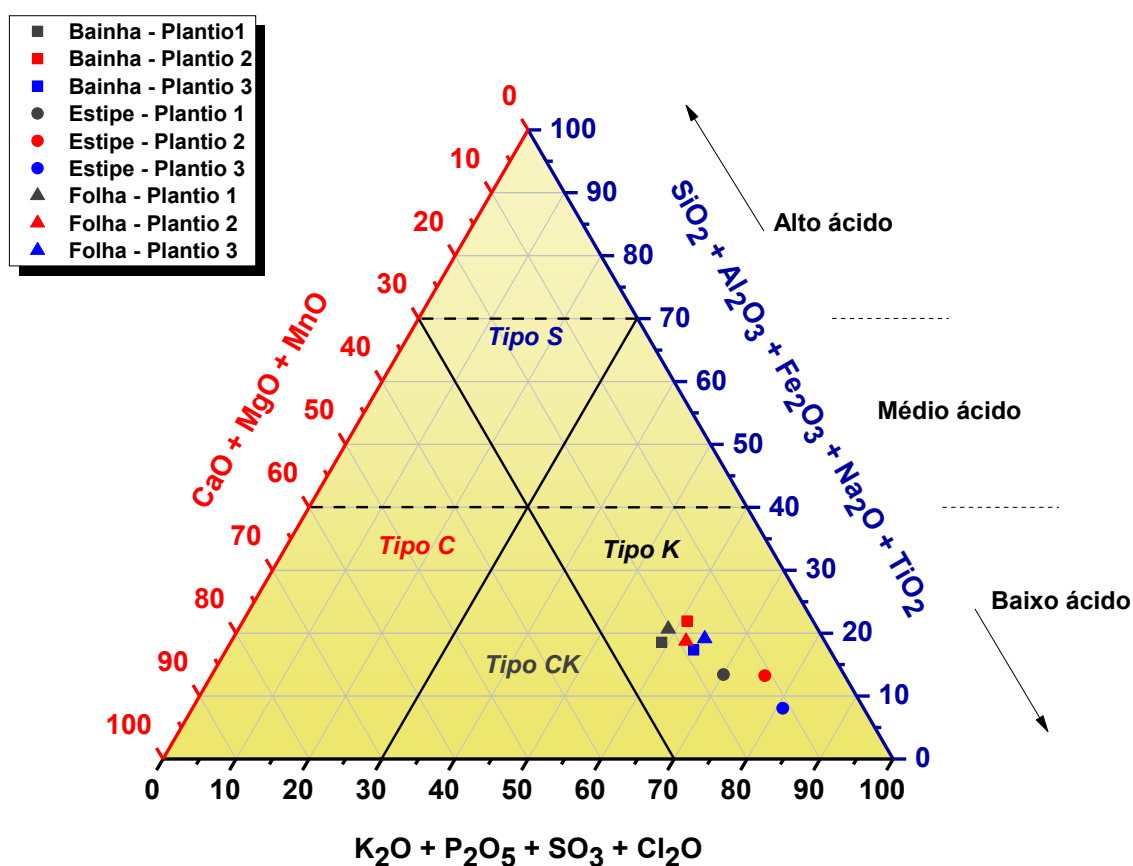
TABELA 23 - PRINCIPAIS ÓXIDOS PRESENTES NAS CINZAS DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* DETERMINADOS POR FRX

Componente	Teor de óxidos (%)														
	K ₂ O	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SO ₃	Cl	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	Rb ₂ O	ZnO	TiO ₂	ZrO ₂
Estipe 1	40,14	11,48	20,07	6,73	9,16	7,66	2,90	1,28	0,12	0,12	0,12	-	0,23	-	-
Bainha 1	29,18	16,70	21,94	9,91	11,80	6,68	2,00	1,00	0,33	0,11	0,22	0,11	-	-	-
Folha 1	29,80	18,76	16,61	8,79	10,40	9,43	2,57	0,43	0,21	0,21	0,21	2,47	0,11	-	-
Estipe 2	48,11	11,21	16,75	5,16	5,04	5,79	5,04	1,01	0,13	-	-	1,64	0,13	-	-
Bainha 2	35,31	19,55	18,13	8,41	8,18	5,45	3,20	1,07	0,36	0,24	0,12	-	-	-	-
Folha 2	32,79	16,61	20,22	8,85	9,62	7,98	1,97	1,09	0,33	0,33	0,11	-	0,11	-	-
Estipe 3	46,53	6,94	24,72	5,37	5,37	7,27	2,68	0,45	0,22	0,22	-	-	0,22	-	-
Bainha 3	37,19	15,80	19,40	10,70	7,09	4,98	3,86	0,75	0,12	-	0,12	-	-	-	-
Folha 3	40,38	15,87	16,47	7,69	7,57	4,45	4,57	1,08	0,60	0,48	0,12	-	0,12	0,12	0,48

FONTE: A autora (2020).

As cinzas dos três componentes da biomassa de pupunheira estudados foram classificadas como do tipo K com tendência de baixa acidez (GRÁFICO 16). Os minerais geralmente encontrados neste tipo de cinza são, na maioria, formados recentemente (secundário e terciário). A temperatura de fusão na deformação inicial para esse tipo de cinza é menor do que 1100 °C, considerada baixa temperatura (VASSILEV; BAXTER; VASSILEVA, 2014).

GRÁFICO 16 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DOS COMPONENTES DA BIOMASSA DE *Bactris gasipaes*



FONTE: A autora (2020).

A composição química das cinzas dos componentes estipe, bainha e folha sugerem severa propensão à escoriação, alta propensão à incrustação, o índice de álcalis indica que haverá a ocorrência de incrustação e escoriação e que há riscos de sinterização durante o processo de combustão, que não seria o ideal para utilizar de forma direta na caldeira. Entretanto, a elaboração de misturas utilizando a biomassa dos componentes da pupunheira em menores proporções, com diferentes biomassas, pode ser uma possibilidade de seu uso direto em caldeiras. Para tal, faz-se necessário de estudos mais aprimorados para definir a quantidade ideal a ser utilizada sem causar prejuízos ao equipamento de queima.

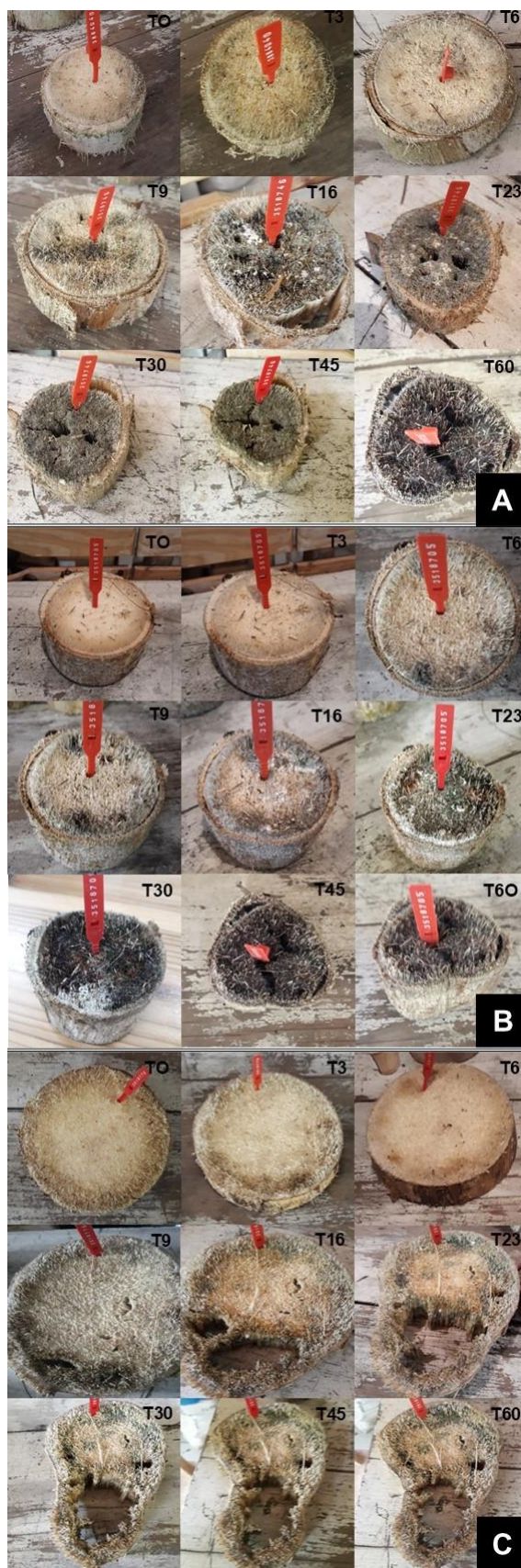
A composição das cinzas dos componentes da biomassa estudada, sugerem a possibilidade de seu uso como fonte de macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, Co, B e Mo) em culturas agrícolas. Segundo (BASU *et al.*, 2009) é possível a utilização de cinzas para correção de solos ácidos como substituto à cal, porém não é recomendado substituir fertilizantes químicos ou adubos orgânicos pelas cinzas, mas podem ser utilizados de forma integrada de modo a potencializar a absorção dos nutrientes pela planta, e com a redução de fertilizantes químicos reduzir a poluição ambiental.

A quantidade, o método e a época de aplicação das cinzas são variáveis que dependem da localização, do sítio, da cultura a ser cultivada, das características edafoclimáticas prevaletentes, e principalmente da composição das cinzas a serem utilizadas. Ressalta-se a importância de pesquisas que possibilitem a utilização de cinzas de diferentes biomassas, de forma eficiente, com redução de custos e que promovam o cuidado com o meio ambiente.

4.3 DEGRADAÇÃO DA BIOMASSA DO ESTIPE DE *Bactris gasipaes* AO LONGO DO TEMPO

O estipe da *B. gasipaes* foi o componente que apresentou o maior teor de umidade, no intuito de realizar secagem natural deste componente, percebeu-se uma rápida degradação deles. A biomassa do estipe das plantas estudadas, visivelmente foram bastante degradadas, como pode ser observado na FIGURA 17.

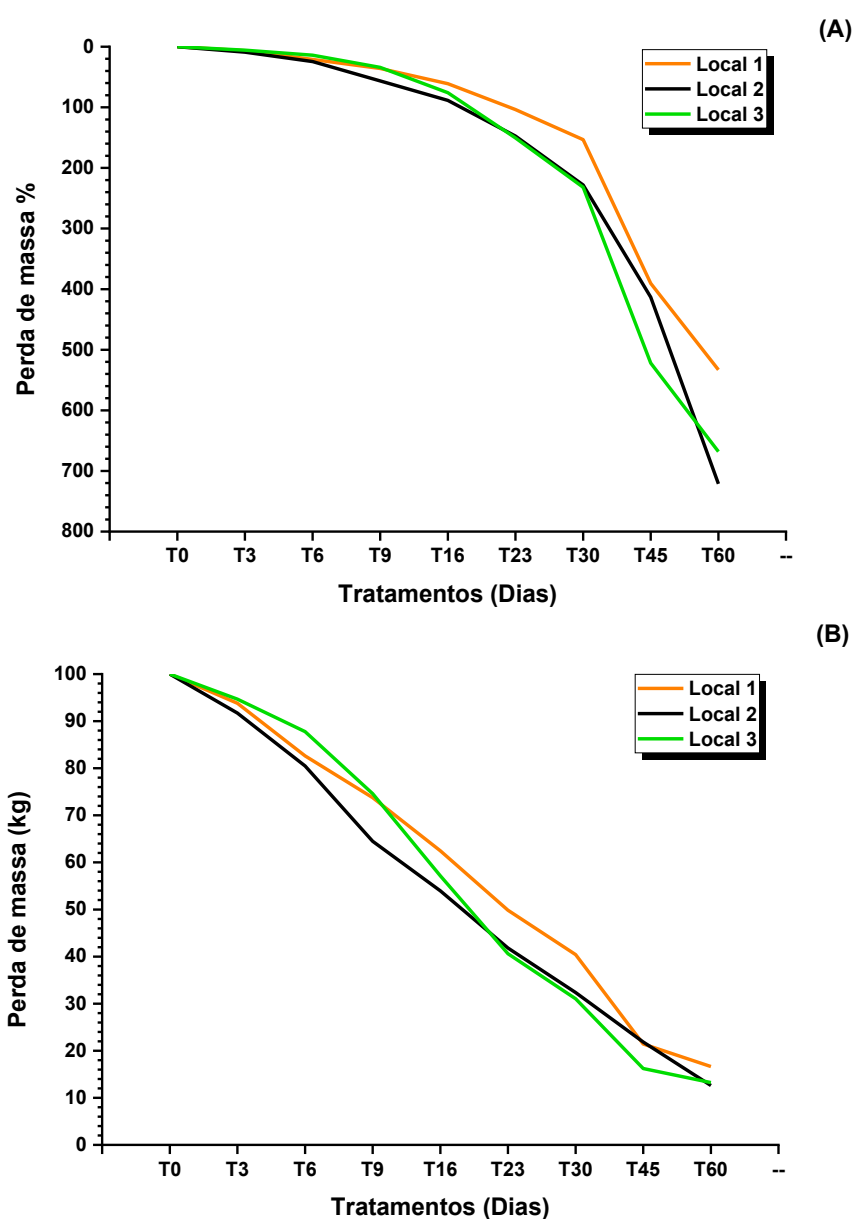
FIGURA 17 - DEGRADAÇÃO DE DISCOS DE *Bactris gasipaes* DOS LOCAIS 1 (A), 2 (B) E 3 (C)



FONTE: a autora (2020)

A biomassa degradada do estipe das plantas de *B. gasipaes* teve expressiva perda de massa ao longo do tempo (GRÁFICO 17), atingindo valores de 533,09% no local 1, 721,20% local 2 e 668,10% no local 3. A biomassa da *B. gasipaes* é um material suscetível ao processo fermentativo e ao ataque de agentes degradadores, o que explica essa expressiva perda de massa do material não degradado para o material degradado ao longo do tempo.

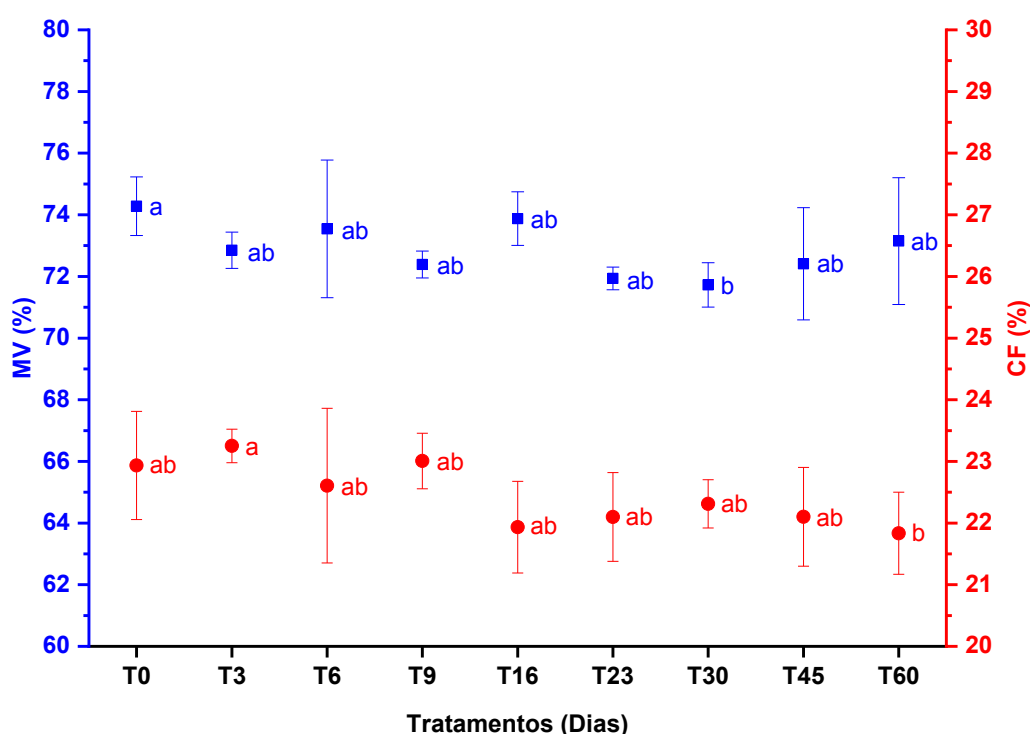
GRÁFICO 17 - PERDA DE MASSA PERCENTUAL (A); PERDA DE MASSA EM KG (B) AO LONGO DO TEMPO PARA BIOMASSA DEGRADADA DO ESTIPE DE *Bactris gasipaes*.



FONTE: a autora (2020)

Foram realizados teste de Shapiro-Wilk e Levene ambos à 5% de significância, as variáveis que não atenderam os critérios foram transformadas para atender as premissas da ANOVA. As variáveis teor de material volátil, teor de carbono fixo e teor de cinza apresentaram diferenças entre os tratamentos (APÊNDICE – D). O teste de Tukey para comparação das médias das variáveis teor de material volátil e carbono fixo são apresentados no GRÁFICO 18.

GRÁFICO 18 - TEORES DE MATERIAL VOLÁTIL E CARBONO FIXO DE BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* EM PROCESSO DE DEGRADAÇÃO NATURAL



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

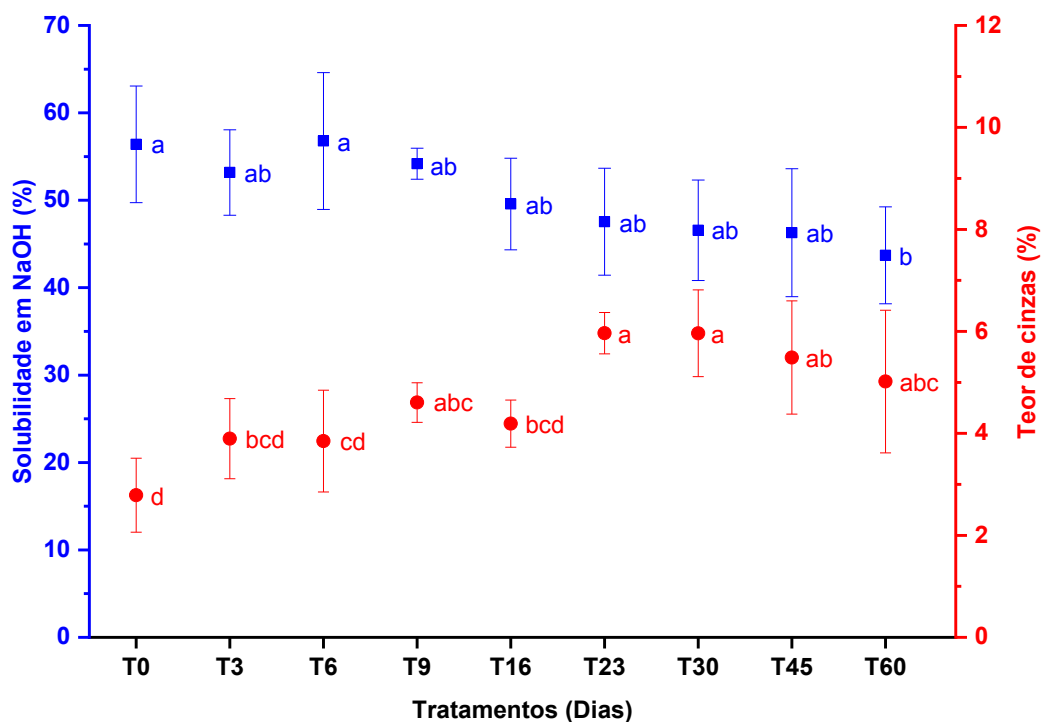
O material volátil apresentou diferenças estatísticas entre os tratamentos, porém as médias ficaram acima de 70%, sendo no T0 observada a maior média 74,28% e nos T23 e T30 os menores valores 71,94% e 71,72% respectivamente. O carbono fixo também apresentou diferenças, as maiores médias foram observadas nos T3 (23,25%) e T9 (23,01%) e as menores médias nos T16 (21,93%) e T60 (21,83%), não havendo tendência de acréscimo ou decréscimo dos valores destas variáveis com relação ao material degradado.

A solução de NaOH 1% extrai carboidratos de baixa massa molecular (açúcares), principalmente polímeros solúveis e celulose degradada. O percentual de solubilidade indica o grau de decomposição do fungo ou a degradação pelo calor, luz, processo de oxidação e outras reações degradantes, e durante a polpação ou o branqueamento (FENGEL; WEGENER, 1989; TAPPI, 2002;).

A análise de variância mostrou que há diferenças entre os tratamentos para as variáveis poder calorífico superior, poder calorífico inferior na umidade do tratamento e solubilidade em NaOH 1% (APÊNDICE - D).

O teste Tukey foi realizado para comparação das diferenças entre as médias das variáveis analisadas. O GRÁFICO 19 mostra a comparação das médias das variáveis solubilidade em NaOH 1% e cinza.

GRÁFICO 19 - SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO 1% E TEOR DE CINZAS DE BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* EM PROCESSO DE DEGRADAÇÃO NATURAL



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Letras minúsculas iguais diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

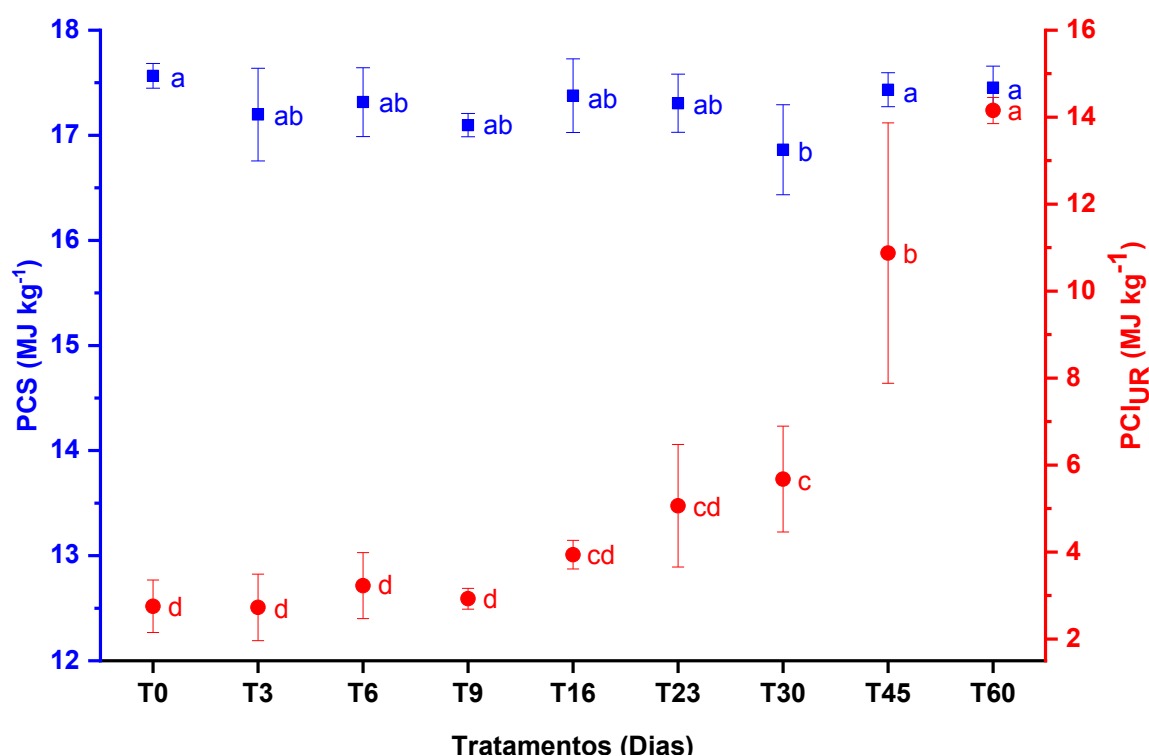
A solubilidade alcalina do estipe da pupunheira apresentou altos valores médios, diminuindo ao longo do tempo. O material exposto foi bastante decomposto, uma possível explicação para o decréscimo na solubilidade do material mais

degradado foi o consumo das hemiceluloses e das celulosas pelos agentes degradadores, restando pouco material para solubilizar.

O percentual de material inorgânico na biomassa degradada (teor de cinza) aumenta ao longo do tempo, comportamento inverso ao da solubilidade em NaOH, já que esta atinge somente a parte orgânica da biomassa.

O teste de Tukey foi aplicado para comparação das médias das variáveis poder calorífico superior e inferior na umidade do tratamento (GRÁFICO 20).

GRÁFICO 20 - PODER CALORÍFICO SUPERIOR E PODER CALORÍFICO INFERIOR NA UMIDADE RECEBIDA DE BIOMASSA DE *Bactris gasipaes* EM PROCESSO DE DEGRADAÇÃO NATURAL



FONTE: A autora (2020).

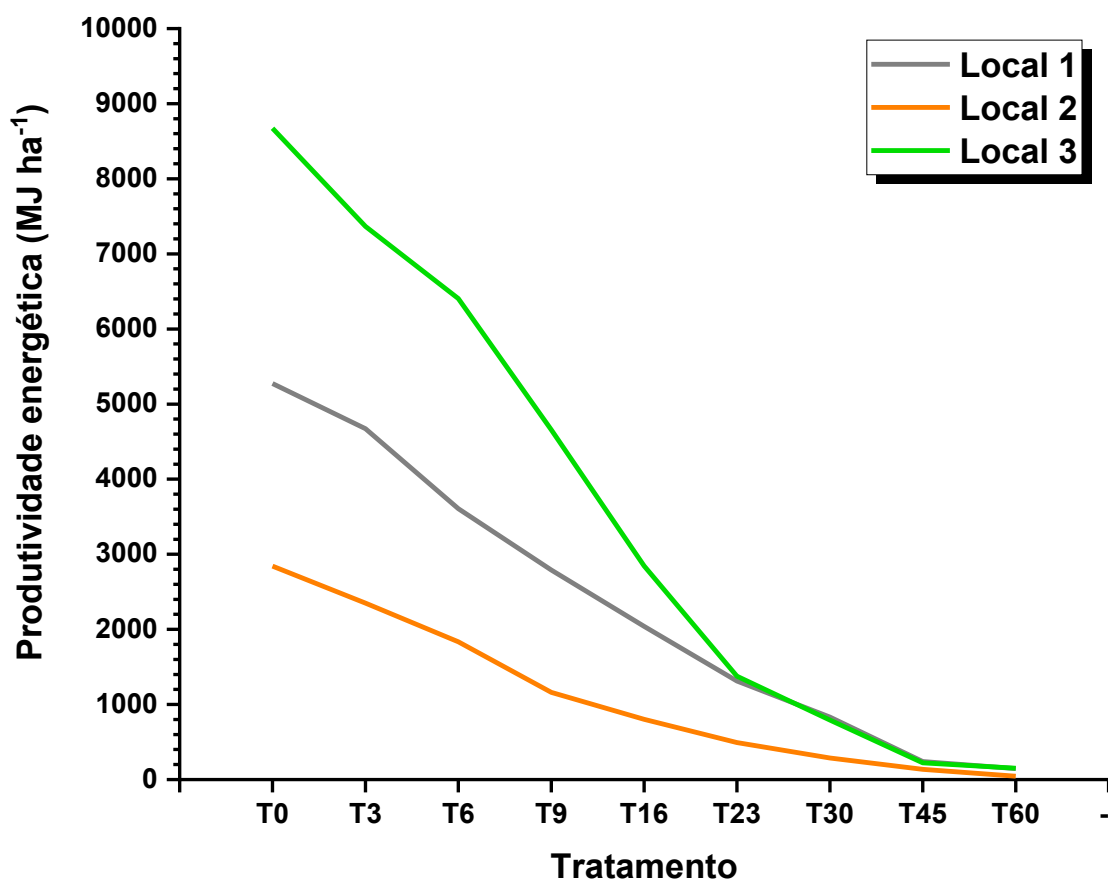
LEGENDA: Letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

O poder calorífico superior apresentou diferenças estatísticas entre os tratamentos, porém somente o tratamento T30 diferiu do tratamento T0, indicando que o processo de degradação natural da biomassa não interfere significativamente na energia liberada pela combustão. O poder calorífico inferior na umidade do tratamento apresentou diferenças significativas, com a análise dos resultados pode-se inferir que a partir do T23 as médias para PCI aumentam, ou seja, há perda de umidade ao longo do tempo.

A variável poder calorífico superior não foi muito afetada pelo processo de degradação, pois os agentes degradadores utilizam primeiro os açúcares simples como a glicose, que é o monômero constituinte da hemicelulose e da celulose. A hemicelulose é mais suscetível a degradação quando comparada à celulose, pois apresenta grau de polimerização menor, possivelmente é o primeiro carboidrato a ser degradado, seguido da celulose. A lignina não é degradada facilmente, o que explica o poder calorífico não ser influenciado pelo processo de degradação.

Ao longo dos 60 dias, a biomassa do estipe perdeu umidade, assim o poder calorífico inferior aumentou em relação ao material sem degradação, inferindo a possibilidade de secagem do material ao ar livre. Entretanto houve acentuada perda de massa na biomassa do estipe ao longo do tempo, pois além de água a parte orgânica foi degradada, o que diminui a produtividade energética (GRÁFICO 21).

GRÁFICO 21 - PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA DA BIOMASSA DEGRADADA DO ESTIPE DE *Bactris gasipaes* EM RELAÇÃO À BIOMASSA NÃO DEGRADADA



FONTE: A autora (2020)

A tendência da produtividade energética do estipe foi diminuir com a degradação natural ao longo do tempo, pois a perda de massa foi acentuada, já que o poder calorífico superior não apresentou diferenças expressivas. Embora a degradação não tenha influenciado diretamente no PCS, a perda de massa diminui o estoque de energia e aumenta o percentual de cinzas na biomassa degradada, há necessidade de mais estudos para garantir a viabilidade de utilizar a biomassa degradada do estipe como fonte de energia.

5 CONCLUSÃO

Com este estudo foi possível concluir:

- A produção de biomassa residual após a colheita do palmito foi expressiva, acima de 20 t ha⁻¹, tendo no local 3, o maior valor produzido;
- A folha foi o componente que apresentou os maiores valores médios para poder calorífico superior e inferior na umidade recebida e teor de lignina;
- A folha foi o componente que apresentou os menores teores de umidade verde e extrativo total;
- A folha foi o componente que apresentou as melhores características para uso fins energéticos, apresentando as maiores médias para produtividade energética.
- O estipe foi o componente menos indicado para uso direto na obtenção de energia, necessitando de secagem para uso com esta finalidade;
- A folha foi o componente mais estável termicamente, apresentando maior índice de combustão e menor índice de ignição;
- O estipe foi o componente com menor estabilidade térmica, maior inflamabilidade e maior combustibilidade;
- A degradação dos estipes ao longo do tempo apresentou acentuada perda de massa do material e decréscimo na produtividade energética;
- A degradação dos estipes de *B. gasipaes* não influenciou na qualidade energética do material, porém teve grande efeito sobre a quantidade de energia produzida.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aprimorar e ampliar os conhecimentos básicos referentes a composição e as propriedades da biomassa da *Bactris gasipaes*, a fim de melhorar o entendimento para fins energéticos e outras possibilidades, em particular com o uso de palmeiras mais velhas;
- Realizar estudos sobre o aproveitamento de biomassa da *Bactris gasipaes* em outros processos de conversão para geração de energia, como a biodigestão anaeróbia e a produção de etanol.
- Aprofundar em estudos para a utilização da biomassa de *B. gasipaes* em processos de carbonização para produção de biocarvão, tanto para fins energéticos, quanto para remediação de solos e estoque de carbono
- Realizar estudos quanto a utilização da biomassa de *Bactris gasipaes* como aditivo em briquetes de *Eucalyptus* spp., a fim de melhorar suas propriedades físico-químicas e energéticas;
- Realizar estudo sobre uso da biomassa da *Bactris gasipaes* como matéria prima para fertilizantes agrícolas;
- Investigar o balanço de nutrientes e a incorporação de matéria orgânica na cultura da *Bactris gasipaes*;
- Realizar análise de viabilidade econômica do uso da biomassa de *Bactris gasipaes* para fins energéticos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D1762-84**: Standard test method for chemical analysis of wood charcol. West Conshohocken, PA, 2013a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D1107-96**: Standart Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood. West Conshohocken, PA, 2013b.

APGIV. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants : **APG IV**. p. 1–20, 2016.

ARAÚJO, E. J. G. DE *et al.* Allometric modelsto biomass in restoration areas in the Atlantic rain forest. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, p. 1–13, 2018.
DOI: 10.1590/2179-8087.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Madeira - Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, RJ, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16550**: Bagaço de cana - Caracterização química. Rio de Janeiro, RJ, 2018.

BASU, M. *et al.* Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. **Progress in Natural Science**, v. 19, n. 10, p. 1173–1186, 2009.
DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.12.006.

ELLETTINI, S.; CORRÊA JÚNIOR, C. Palmeiras para produção de palmitos no litoral do paraná: uma alternativa ao extrativismo predatório. In: **Estratégias metodológicas da extensão rural do Paraná**. Volume II. Curitiba: EMATER, 2010. p. 56–60.

BITTENCOURT, K. C. *et al.* Productive regional concentration in the state of Paraná : a case study of non-timber forest products. **Revista Floresta**, v. 49, n. 4, p. 633–640, 2019. DOI: 10.5380/rf.v49 i4.55357.

BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal**. Rio de Janeiro, RJ: Interci ncia, 2010.

BURATTI, C. *et al.* Thermogravimetric analysis of the behavior of sub- bituminous coal and cellulosic ethanol residue during co- combustion. **Bioresource Technology**, v. 186, p. 154 - 162, 2015. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.03.041.

CAI, J. *et al.* Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 309–322, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.072.

CHACÓN, E. S. *et al.* Micromorfología de los folíolos de pejibaye *Bactris gasipaes* (Arecaceae) var. Diamantes - 10. **Revista de Biología Tropical**, v. 64, n. 3, p. 1273–1285, 2016.

CHAIMSOHN, F. P. Cultivo de pupunha para palmito. Importância, mercado e aspectos biológicos e agrônômicos. In: **Curso sobre cultivo, processamento e comercialização de palmito pupunha**. Ponta Grossa, PR: 2001, p. 150.

CHAVE, J. *et al.* Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, n. 1, p. 87–99, 2005. DOI: 10.1007/s00442-005-0100-x.

CLEMENT, C. R. *et al.* Origin and Dispersal of Domesticated Peach Palm. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 5, n. 148, p. 1–19, 2017. DOI: 10.3389/fevo.2017.00148.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para Energia**. Editora Unicamp. Campinas, SP: 2008.

DEMIRBAS, A. Higher heating values of lignin types from wood and non-wood lignocellulosic biomasses. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 39, n. 6, p. 592–598, 2017. DOI: 10.1080/15567036.2016.1248798.

DIAS, J. M. C. D. S. *et al.* **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia - circular técnica n° 13, 2012.

EBERHARD, A. A. Fuelwood Calorific Values in South Africa. **South African Forestry Journal**, v. 1, n. 152, p. 17–22, 1990. DOI: 10.1080/00382167.1990.9629014

EL MAY, Y. *et al.* Study on the thermal behavior of different date palm residues: Characterization and devolatilization kinetics under inert and oxidative atmospheres. **Energy**, v. 44, n. 1, p. 702–709, 2012. DOI: 10.1016/j.energy.2012.05.022.

FARIA, W. S. *et al.* Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em *pellets* para geração de energia térmica. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 137–147, 2016. DOI: 10.25186/cs.v11i1.1050.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood : Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Berlin - Nova York: Walter de Gruyter, 1989.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote Experimental Desingns (Portuguese)** R package version 1.2.0, 2018.

FONTOURA, M. R. *et al.* Modelos alométricos para estimativa de biomassa em área de regeneração natural de *Ateleia Glazioviana* Baill. **Floresta**, v. 47, n. 4, p. 469–478, 2017. DOI: 10.5380/uf.v47i4.53988.

GALLUZZI, G. *et al.* An Integrated Hypothesis on the Domestication of *Bactris gasipaes*. **PLoS ONE**, v. 10, n. 12, p. 1–24, 2015.
DOI: 10.1371/journal.pone.0144644.

GARCIA, V. A. *et al.* Características do resíduo de mineração de areia como componente de substratos para a produção de mudas de pupunheira (*Bactris gasipaes* Kunth). **Revista Arvore**, v. 35, n. 3 SUPPL.1, p. 595–604, 2011.
DOI: 10.1590/S0100-67622011000400003.

HARO, E. E.; SZPUNAR, J. A.; ODESHI, A. G. Dynamic and ballistic impact behavior of biocomposite armors made of HDPE reinforced with chonta palm wood (*Bactris gasipaes*) microparticles. **Defence Technology**, v. 14, p. 238–249, 2018.
DOI: 10.1016/j.dt.2018.03.005.

HENDERSON, A. **Bactris (Palmae)**. Bronx, New York: The New York Botanical Garden, 2000. v. 79

IDRIS, S. S.; RAHMAN, N. A.; ISMAIL, K. Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). **Bioresource Technology**, v. 123, p. 581–591, 2012. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.07.065.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables Information: Overview 2019**. IEA, 2019. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/renewables-information-2019>>. Acesso em: 25 out. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **INMET - Estações Automáticas**. Disponível em: <www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTg3Mw==>. INMET, 2019. Acesso em: 6 abr. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal**. IBGE, 2019. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>>. Acesso em: 16 out. 2019.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Relação dos municípios segundo as regiões geográficas do paraná - 2012**. IPARDES, 2012. Disponível em: <www.ipardes.gov.br>. Acesso em: 16 out. 2019

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 18125:2017**: Solid biofuels — Determination of calorific value. Vernier, GE, 2017.

JENKINS, B. *et al.* Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, p. 17–46, 1998. DOI: 10.1016/S0378-3820(97)00059-3.

KONG, S. H. *et al.* Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 729–739, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.107.

LIN, H. *et al.* Structural evolution of chars from biomass components pyrolysis in a xenon lamp radiation reactor. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 25, p.

232–237, 2017. DOI: 10.1016/j.cjche.2016.08.002.

LIU, W. J.; JIANG, H.; YU, H. Q. Thermochemical conversion of lignin to functional materials: a review and future directions. **Green Chemistry**, v. 17, n. 11, p. 4888–4907, 2015. DOI: 10.1039/c5gc01054c.

LOH, S. K. The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source. **Energy Conversion and Management**, v. 141, p. 285–298, 2017. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.08.081.

LOPES, A. P. *et al.* Composição química do estipe e tecido esponjoso pupunha. **VII Jornada de Iniciação Científica do INPA**, p. 132–135, 1998.

LORENZI, H. *et al.* **Palmeiras brasileiras e exóticas e cultivadas**. 1ª ed. Editora Plantarum LTDA, 2004.

LU, J.; CHEN, W. Investigation on the ignition and burnout temperatures of bamboo and sugarcane bagasse by thermogravimetric analysis. **Applied Energy**, v. 160, p. 49–57, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.09.026.

MA, Z. *et al.* Comparison of the thermal degradation behaviors and kinetics of palm oil waste under nitrogen and air atmosphere in TGA-FTIR with a complementary use of model-free and model-fitting approaches. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 134, p. 12–24, 2018. DOI: 10.1016/j.jaap.2018.04.002.

MAGELLAN, T. M.; TOMLINSON, P. B.; HUGGETT, B. A. Stem anatomy in the spiny american palm *Bactris* (Arecaceae-Bactridinae). **Hoehnea**, v. 42, n. 3, p. 567–579, 2015. DOI: 10.1590/2236-8906-18/2015.

MAKKAWI, Y. *et al.* Fast pyrolysis of date palm (*Phoenix dactylifera*) waste in a bubbling fluidized bed reactor. **Renewable Energy**, v. 143, p. 719–730, 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2019.05.028.

MANI, T. *et al.* Pyrolysis of wheat straw in a thermogravimetric analyzer: Effect of particle size and heating rate on devolatilization and estimation of global kinetics. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 88, n. 8, p. 952–958, 2010. DOI: 10.1016/j.cherd.2010.02.008.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3.

MEYER, H. A. A correction for a systematic error occurring in the application to the logarithmic equation. **The Pennsylvania Agriculture Station Forest School Research Paper**, v. 7, n. 1058, p. 1–7, 1941.

MORA-URPÍ, J.; WEBER, J. C.; CLEMENT, C. R. **Peach Palm *Bactris gasipaes* Kunth. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops 20**. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben / International Plant Genetic Resources Institute, Roma, 1997.

MORAES, J. E. DE. **Valor nutritivo e formas de utilização do resíduo de palmito de pupunha (*Bactris gasipaes*) para ruminantes**. Dissertação (Mestrado em Produção Animal Sustentável. Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios. Instituto de Zootecnia, Nova Odessa, 2011. Disponível em: <<http://www.iz.sp.gov.br/pdfs/1328531786.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

NEVES, E. J. M. *et al.* **Manejo de pupunheira (*Bactris gasipaes* Kunth) para palmito em áreas sem restrições hídricas**. Colombo, PR: Embrapa Florestas - Circular técnica 89, 2004.

NEVES, E. J. M. *et al.* **Cultivo da Pupunheira para Palmito nas Regiões Sudeste e Sul do Brasil**. Colombo, PR: Embrapa Florestas - Circular técnica 143, 2007.

OLIVEIRA, R. S. **Produção e qualidade energética de clones de *Eucalyptus* cultivados na amazônia oriental**. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019. Disponível em: <<https://www.prppg.ufpr.br/signa/visitante/trabalhoConclusaoWS?idpessoal=57464&idprograma=40001016015P0&anobase=2019&idtc=1422>>. Acesso em: 23 abr. 2020. CURITIBA. 2019.

PENTEADO JUNIOR, J. F.; SANTOS, ÁLVARO F. DOS; NEVES, E. J. M. **Aspectos do agronegócio do palmito de pupunha no Brasil**. Colombo, PR: Embrapa Florestas - Circular Técnica 275, 2014.

PENTEADO JUNIOR, J. F.; SANTOS, Á. F. DOS; NEVES, E. J. M. **Rentabilidade econômica do cultivo da pupunheira (*Bactris gasipaes* Kunth), destinada à produção de palmito no Litoral de Santa Catarina**. Colombo, PR: Embrapa Florestas - Circular técnica 195, 2010.

PICHELLI, K. Palmito de pupunha aumenta renda ao agricultor e ajuda a proteger a Mata Atlântica. **Embrapa notícias**, Colombo, PR, 25 ago. 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/4799110/palmito-de-pupunha-aumenta-renda-ao-agricultor-e-ajuda-a-proteger-a-mata-atlantica>>. Acesso em: 22 fev. 2018.

PICHELLI, K. Cultivo de pupunha redesenha a agricultura do litoral do Paraná. **Embrapa notícias**, Colombo, PR, 14 mar. 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/20828921/cultivo-de-pupunha-redesenha-a-agricultura-do-litoral-do-parana>>. Acesso em: 15 out. 2019.

POLLETO, M.; JÚNIOR, H. L. O.; ZATTERA, A. J. Native Cellulose: Structure, Characterization and Thermal Properties. **Materials**, v. 7, p. 6105–6119, 2014. DOI: 10.3390/ma7096105.

R CORE TEAM, R. **R: A language and enviromental for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Viena, Austria, 2019. Disponível em: <<http://cran-r.c3sl.ufpr.br/>>

ROWELL, R. M. (Ed.). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**.

Taylor & Francis, 2005.

SILVA, M. DAS G. C. P. C. **Cultivo da pupunheira**. Radar técnico - CEPLAC, Itabuna, BA, [s.d.]. Disponível em: <[http://www.ceplac.gov.br/radar/CULTIVO DA PUPUNHEIRA.pdf](http://www.ceplac.gov.br/radar/CULTIVO_DA_PUPUNHEIRA.pdf)>. Acesso em : 02 set. 2015.

SUKIRAN, M. A. *et al.* A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production. **Energy Conversion and Management**, v. 149, p. 101–120, 2017. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.07.011.

SZLAPAK, T. *et al.* Nanocellulose obtained from residues of peach palm extraction (*Bactris gasipaes*). **Carbohydrate Polymers**, v. 218, p. 8–19, 2019. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.04.035.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Artmed Editora Ltda. Porto Alegre: 2017.

TANNOUS, K. (Ed.). **Innovative solutions in fluid-particle systems and renewable energy management**. IGI Global. Hershey, PA: 2015.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T212 om-02**: One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. Peachtree Corners, GA, 2002.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 222 om-15**: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. Peachtree Corners, GA, 2015.

ULLAH, K. *et al.* Assessing the lignocellulosic biomass resources potential in developing countries: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 682–698, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.044.

VASSILEV, S. V. *et al.* An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. **Fuel**, v. 94, p. 1-33, 2012. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.09.030.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; VASSILEVA, C. G. An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter. **Fuel**, v. 112, p. 391-449, 2013. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.09.030.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; VASSILEVA, C. G. An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. **Fuel**, v. 117, p. 152-183, 2014. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.09.024.

APÊNDICE A - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS UMIDADE E PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio		
		U _{bu} (%)	GL	PE (MJ ha ⁻¹)
Componente	2	44651*	2	5,634*
Local	2	339,5*	2	0,039^{ns}
Classe	2	3,283^{ns}	2	1,330*
Componente x Local	4	60,939*	4	0,178*
Componente x Classe	4	36,527*	4	0,102*
Local x Classe	4	39,725*	4	0,120*
Componente x Local x Classe	8	38,042*	8	0,036^{ns}
Resíduo	216	10,444	54	0,036
Total	243		81	
R²_{aj}		0,97		0,84
CV		2,41		0,03

LEGENDA: U_{bu}: Umidade na base úmida; PE: Produtividade energética.

**APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS MATERIAL
VOLÁTIL, CARBONO FIXO, CINZA, PODER CALORÍFICO SUPERIOR, INFERIOR
E INFERIOR NA UMIDADE RECEBIDA**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio					
		MV (%)	CF (%)	CZ (%)	PCS (MJ kg ⁻¹)	PCI (MJ kg ⁻¹)	PCI _{UR} (MJ kg ⁻¹)
Componente	2	13,94*	7,13*	3,88*	22,88*	22,88*	152442*
Local	2	4,68 ^{ns}	3,96*	2,88*	0,128 ^{ns}	0,128 ^{ns}	2376*
Classe	2	8,76*	2,73 ^{ns}	5,51*	0,289*	0,295*	50,33 ^{ns}
Componente x Local	4	11,50*	5,26*	1,50*	0,181*	0,184*	1095*
Componente x Classe	4	5,52*	1,04 ^{ns}	6,41*	0,222*	0,222*	168,24 ^{ns}
Local x Classe	4	9,39*	6,34*	4,83*	0,249*	0,250*	539,21**
Componente x Local x Classe	8	4,14*	2,03*	1,27*	0,191*	0,189*	220,29*
Resíduo	135	1,98	0,96	0,54	0,58	0,57	96,82
Total	162						
R ² _{aj}		0,31	0,31	0,45	0,84	0,84	0,95
CV		1,94	6,06	37,93	7,91	8,50	30,79

LEGENDA: MV: material volátil; CF: carbono fixo; CZ cinza; PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior; PCI_{UR}: poder calorífico inferior na umidade recebida.

**APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS EXTRATIVO,
LIGNINA E HOLOCELULOSE**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio		
		Extrativo (%)	Lignina (%)	Holocelulose (%)
Componente	2	1023*	500,47*	210,99*
Local	2	27,88*	16,59*	32,22*
Classe	2	8,28*	15,89*	46,61*
Componente x Local	4	50,53*	11,05*	57,39*
Componente x Classe	4	5,94*	7,28*	16,83*
Local x Classe	4	15,43*	16,27*	12,59*
Componente x Local x Classe	8	7,59*	3,52*	7,51*
Resíduo	27	0,187	0,390	0,550
Total	54			
R²_{aj}		0,99	0,98	0,97
CV		4,63	10,30	2,54

APÊNDICE D – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA ENSAIO DE DEGRADAÇÃO DO ESTIPE DE BACTRIS GASIPAES

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio					
		MV (%)	CF (%)	CZ (%)	NaOH (%)	PCS (MJ kg ⁻¹)	PCI _{UR} (MJ kg ⁻¹)
Tratamento	8	4,61*	1,59*	6,88*	137,99*	0,269*	99,82*
Resíduo	45	1,71	0,55	0,730	34,98	0,086	1,58
Total	54						
R ² _{aj}		0,20	0,22	0,56	0,31	0,24	0,90
CV		1,79	3,3	18,42	11,72	1,70	22,02

LEGENDA: MV: material volátil; CF: carbono fixo; CZ cinza; NaOH: Solubilidade em hidróxido de sódio; PCS: poder calorífico superior; PCI_{UR}: poder calorífico inferior na umidade recebida.